

二酸化炭素地中貯留技術研究組合の 研究開発状況

二酸化炭素地中貯留技術研究組合・技術部長

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)
CO₂貯留研究グループリーダー

せつ じきゅう

薛 自求

Ziqiu Xue (xue@rite.or.jp)



地中貯留技術の実用化・事業化へ

投資

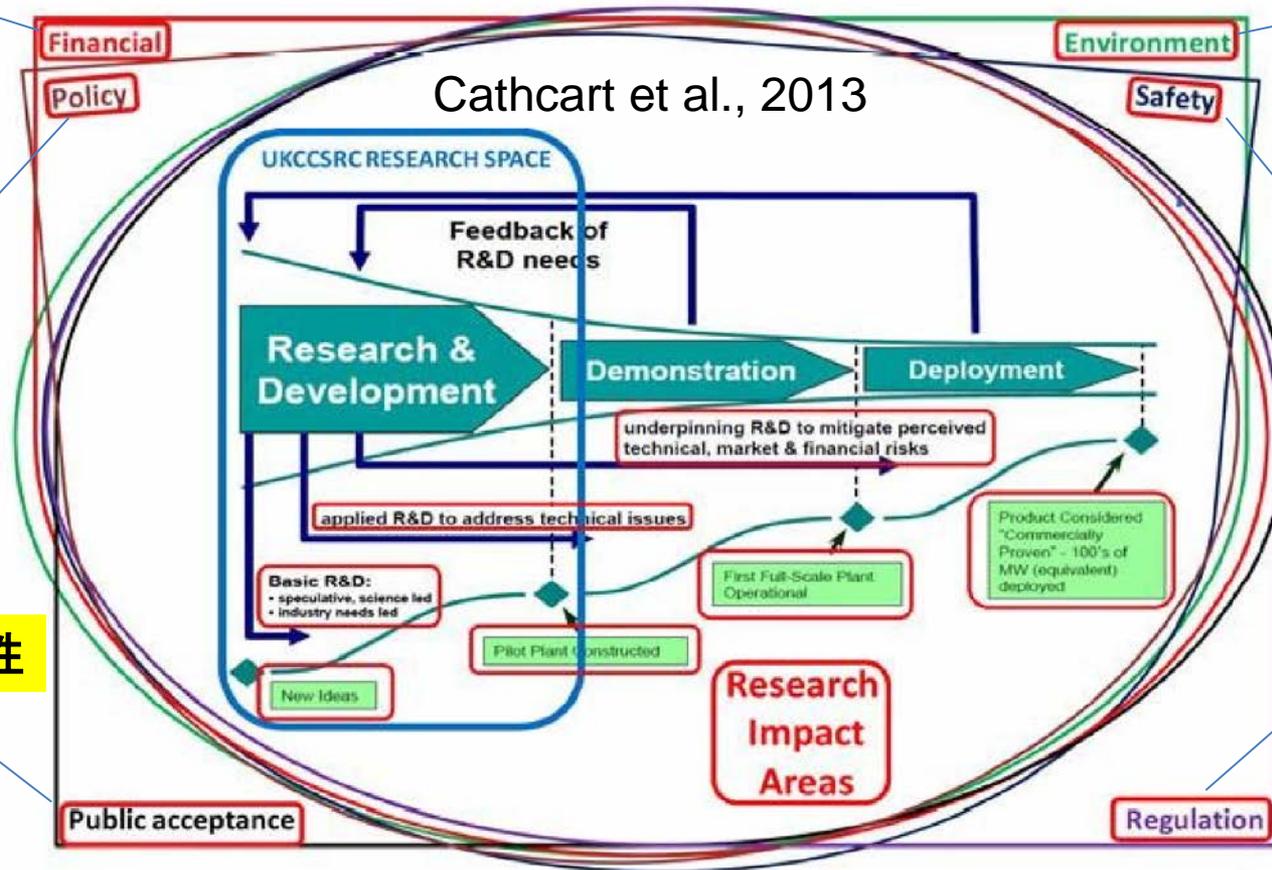
環境

政策

安全性

社会的受容性

法規



技術や知見の提供

Research & Development \longleftrightarrow Demonstration, Deployment

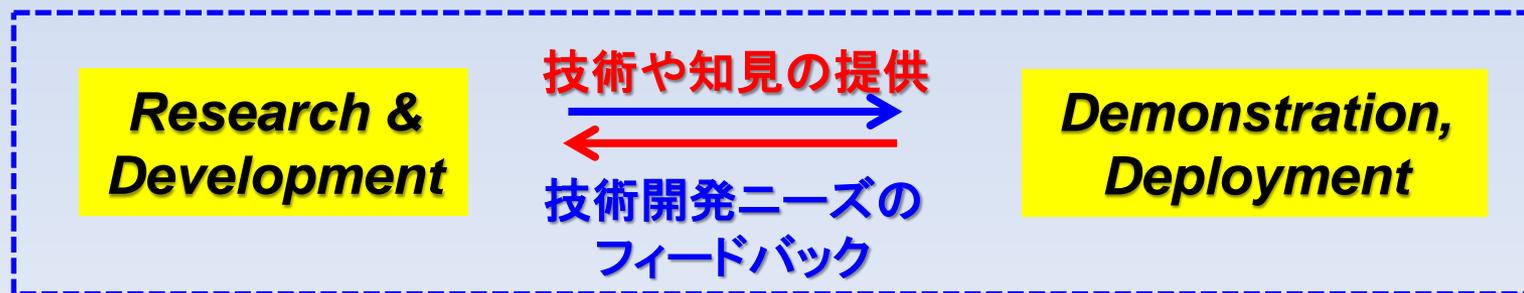
技術開発ニーズのフィードバック

➤ 大規模CO₂地中貯留の実用化に向けて

✓ 油ガス田開発技術・経験・ノウハウを活用しても、**取り組む**べき技術課題がある

✓ 商業規模のCCS事業サイトは、**既存油ガス田** 或いはその近傍に立地し、**豊富な地下データ**に恵まれている

✓ **安全性** (リスクマネジメント)、**経済性** (コスト削減)、**社会的受容性の向上**



High Level Carbon Storage Program Goals (*Current Goals*)

- 永久的・経済的・安全に (permanently, **economically** and safely)
- **貯留効率向上** (*Improve Reservoir **Storage Efficiency***)
- 貯留量評価 (predict storage capacity within **±30%**)

Carbon Storage R&D Challenges Storage Infrastructure

- **安全に・永久的・費用対効果** (Safe, Permanent and Cost-effective)
- 陸域 & **海域貯留** (Onshore and Offshore)
- **費用対効果**に優れた貯留・**モニタリング技術** (Cost-effective Integrated Tech)
- CO₂-EOR & **貯留層圧力制御技術** (Reservoir Pressure Management)
- **効果的**なPA/PO (Effective Public Outreach)

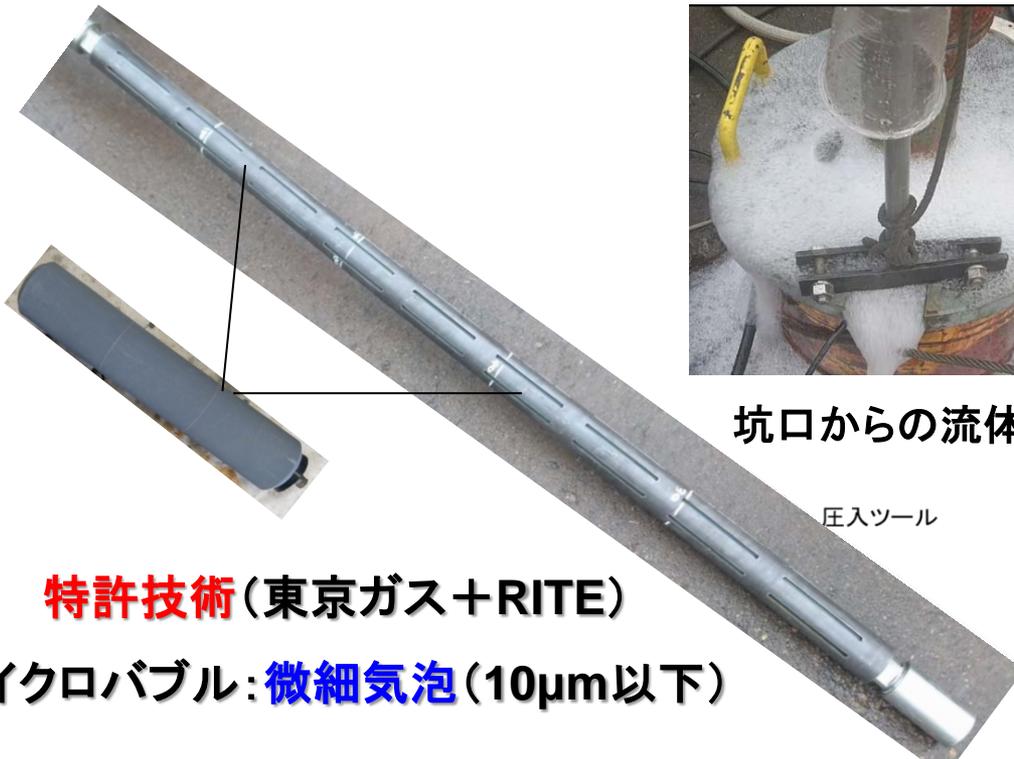
RITE/JAPEX: マイクロバブルCO₂ツール開発

ツール製作について

- ・ 設置タイプ: リトリーバブルタイプ
- ・ 設置場所: チュービング先端
- ・ 設置方法: スリックライン
- ・ 形状: 外筒にスリット、多連続可

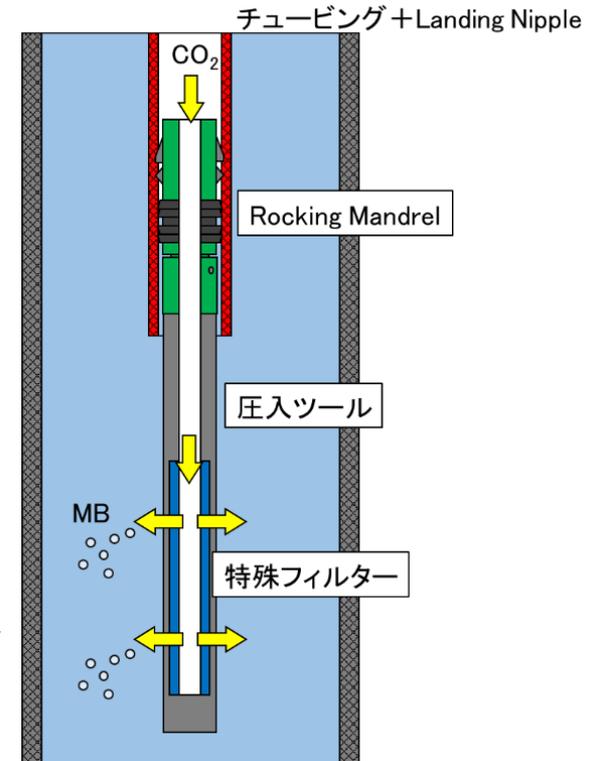
マイクバブル圧入による掃攻効率改善

CCSに加えて、EORへの適用も



圧入ツール

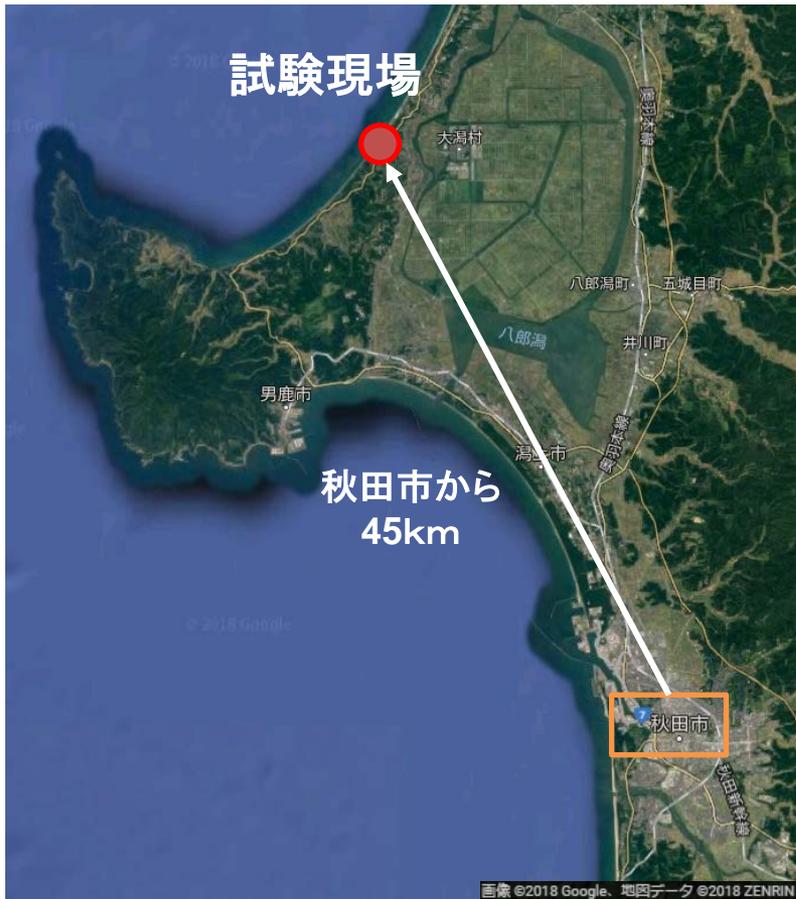
ケーシング



マイクロバブルCO₂圧入現場実証試験計画

▶ 実証試験現場

石油資源開発(株) 申川油田
(秋田県男鹿市)



▶ 対象層

- ・ 申川Ⅲ層 (SK-77)
- ・ 深度: 約900m
- ・ 油層温度: 50°C
- ・ 岩相: 砂層 (砂泥互層)
- ・ 層厚: 16m



▶ 試験時期

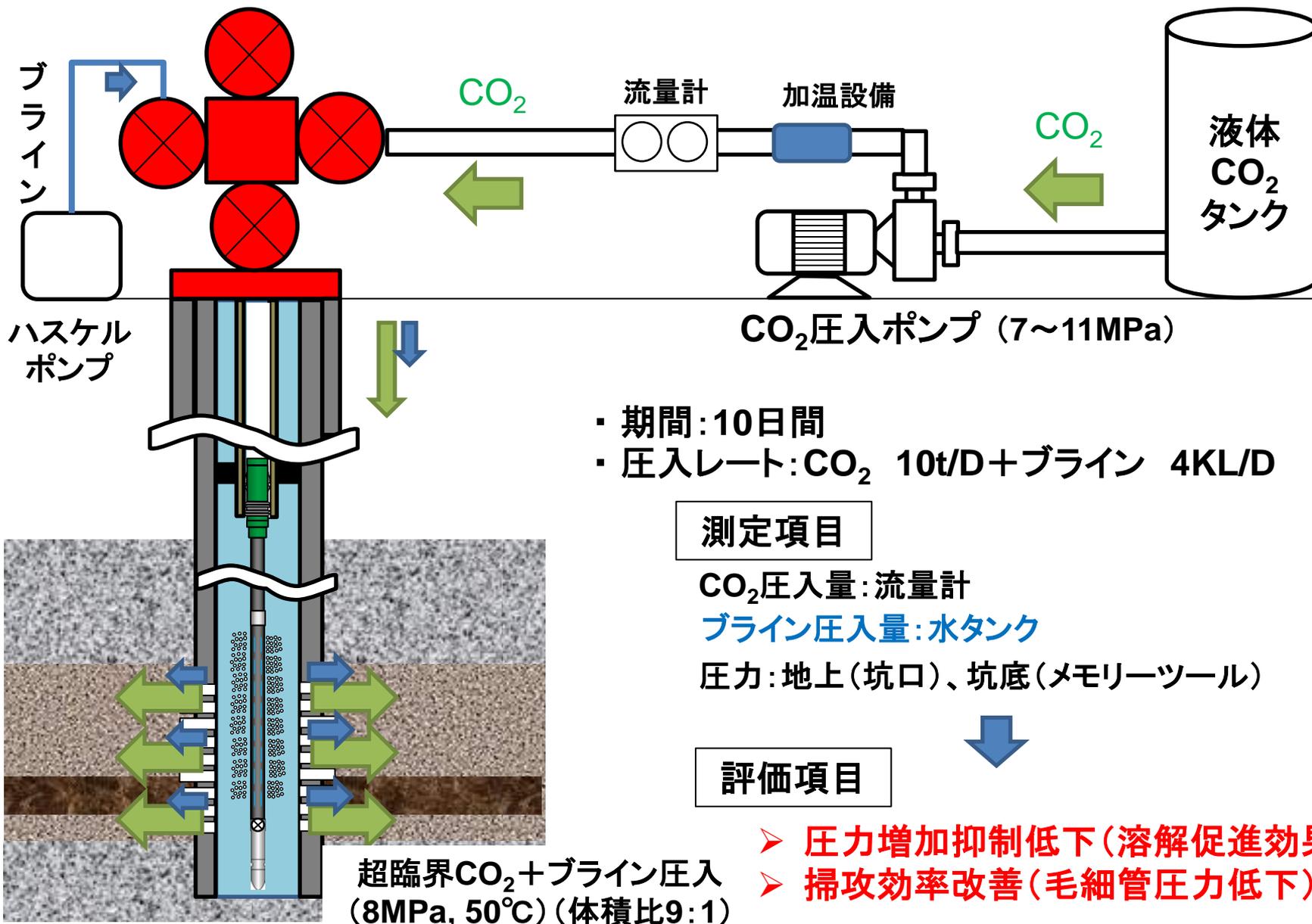
- 平成31年5-6月 (MB)、10-11月 (NB)
 - ✓ MB: マイクロバブルCO₂圧入
 - ✓ NB: 通常のCO₂圧入
- 試験期間: 各試験1ヶ月程度

▶ 試験手法

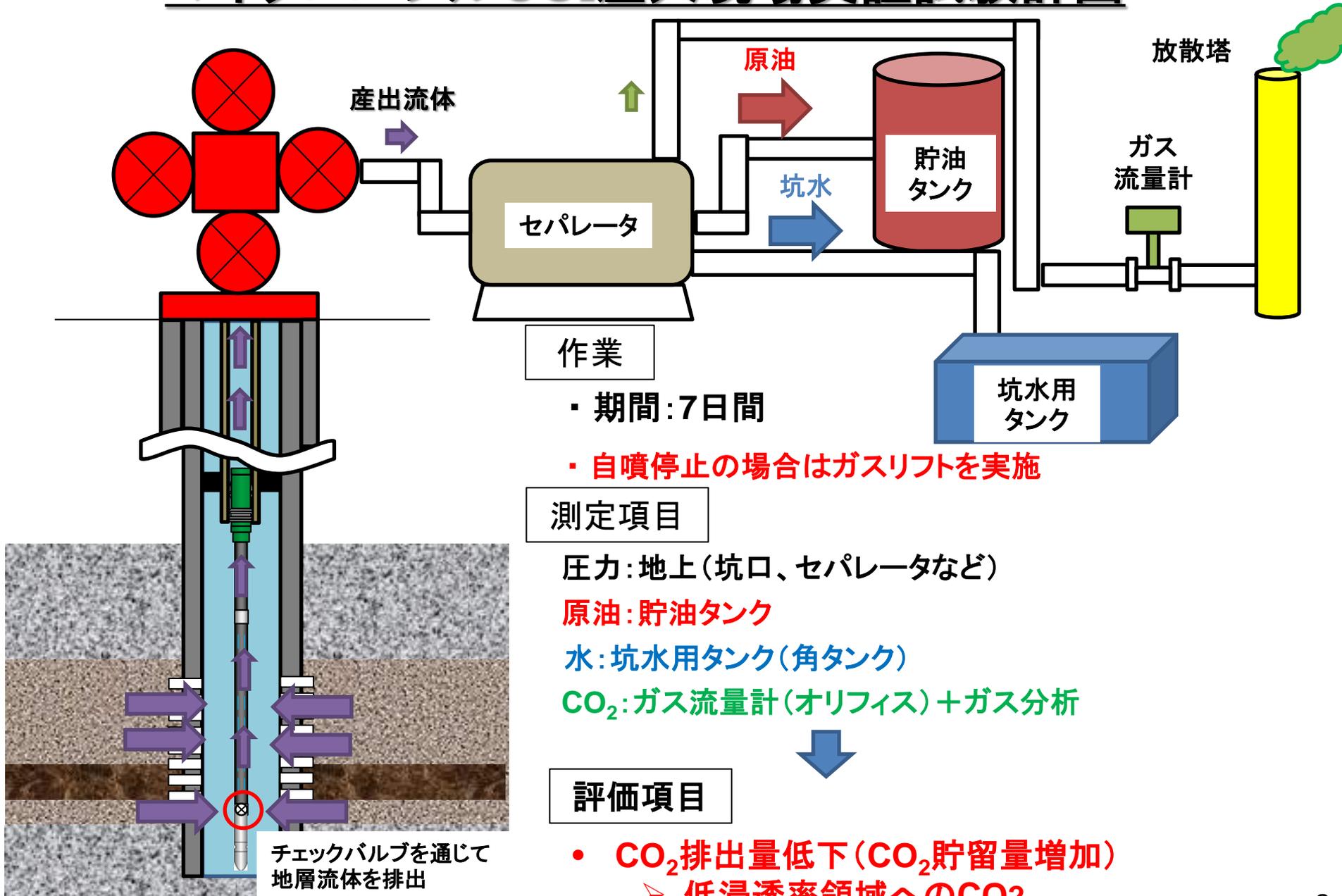
Huff'n Puff 法

1. CO₂圧入 (MB): 10t/day、計100t
 - ✓ MBを連続して圧入するために、水との同時圧入を適用。 ※コア実験結果を基に体積比@圧入層でCO₂:水=9:1
2. フローバック

マイクロバブルCO₂圧入現場実証試験計画



マイクロバブルCO₂圧入現場実証試験計画



・ 期間:7日間

・ 自噴停止の場合はガスリフトを実施

測定項目

圧力:地上(坑口、セパレータなど)

原油:貯油タンク

水:坑水用タンク(角タンク)

CO₂:ガス流量計(オリフィス)+ガス分析

評価項目

・ CO₂排出量低下(CO₂貯留量増加)

➢ 低浸透率領域へのCO₂

H30年度事業内容

研究課題		実施組合員
①大規模CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の開発	①-1.圧入安全管理システムの開発	RITE、JAPEX、INPEX
	①-2.CO ₂ 長期モニタリング技術の確立	AIST
	①-3.大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立	JAPEX、RITE 応用地質
	①-4.大規模貯留層に適したCO ₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立	RITE、大成建設、 応用地質
	①-5.光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発	RITE、INPEX、 AIST
	①-6.CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	RITE
	①-7.リスクマネジメントツール(NRAP)をはじめとする日米CCS協力や海外機関とのCCUS技術開発の連携	RITE
②大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発	②-1.CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	大成建設、RITE
	②-2.マイクロバブルCO ₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上	RITE、JAPEX
③CCS普及条件の整備、基準の整備	③-1.CO ₂ 貯留安全性管理プロトコル(IRP)の整備	RITE
	③-2.苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化(ISO TC265)との連携	RITE
	③-3.CCSの広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討	RITE、AIST

➤大規模CO₂地中貯留における**安全性** **向上**に向けてのリスクマネジメント

- ✓ 圧入サイト周辺の自然地震や微小振動の観測
(圧入安全性管理ツールATLSの開発)

ATLS: Advanced Traffic Light System



H30 : システムがほぼ完成

H31-32: 試験運用・検証

→→ 実適用へ

非在来型資源開発にも同様な動き

地下への流体圧入

(地熱開発、水圧破碎、非在来型資源開発)



地層の間隙水圧力 (**pore pressure**) 増加、
有効応力 (**effective stress**) 減少



Injection-Induced Seismicity

地下資源開発、**CO₂地中貯留**

Table 1
Summary of seismicity observations at recent CO₂ injection operations.

Project	Category	Monitoring design	Observations ^a	Seismicity Type ^b	References
Aneth USA	CO ₂ -EOR	Borehole Array M-1.2 to M0.8	Magnitudes: M-1.2 to M0.8 Frequency: 3800 events over 1 year. Two fault-like clusters.	II	Rutledge (2010), Zhou et al. (2010), Soma and Rutledge (2013)
Cogdell USA	CO ₂ -EOR	Regional Network M4.4, M3+	One M4.4 event and 18 magnitude 3+ events over a 6 year period. No major seismicity at nearby, similar operations.	I	Gan and Frohlich (2013), Davis and Pennington (1989)
Weyburn Canada	CO ₂ -EOR	Borehole Array M-3 to M-1	Magnitudes: M-3 to M-1 . Frequency: 100 events over 7 years. Diffuse locations.	II	Whittaker et al. (2011), White et al. (2011), Verdon et al. (2010, 2011)
Decatur USA	Dedicated Storage	Borehole Arrays Surface Stations M-2 to M1	Magnitudes: M-2 to M1 Frequency: 10,123 events over 1.8 years. Multiple fault-like clusters.	I	Will et al. (2014), Couëslan et al. (2014), Kaven et al. (2014, 2015)
In Salah Algeria	Dedicated Storage	Borehole Array M-1 to M1	Magnitudes: M-1 to M1 . Frequency: 5500 events over 2 years. Indications of fracture stimulation.	I & II	Oye et al. (2013), Goertz-Allmann et al. (2014), White et al. (2014b), Verdon et al. (2015)

^a **M** = moment magnitude.

^b Type I = seismicity concentrated within overpressured zone. Type II = seismicity outside overpressured zone.

圧力増加域内、あるいは域外 →→→ イベントの位置評定 (location) が重要!

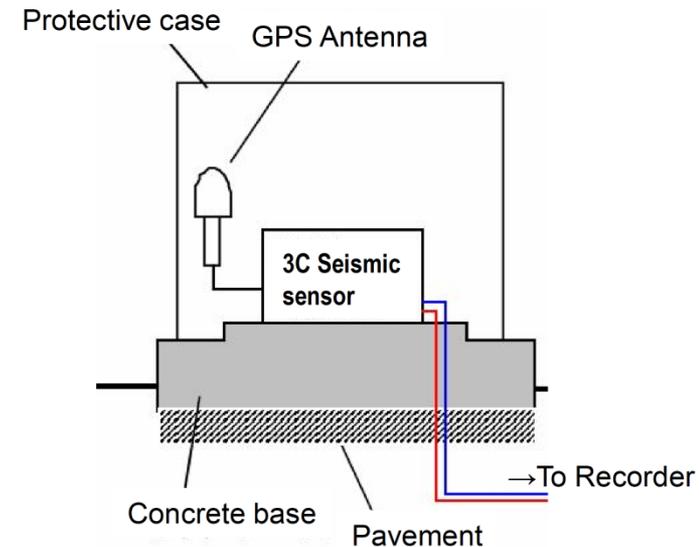
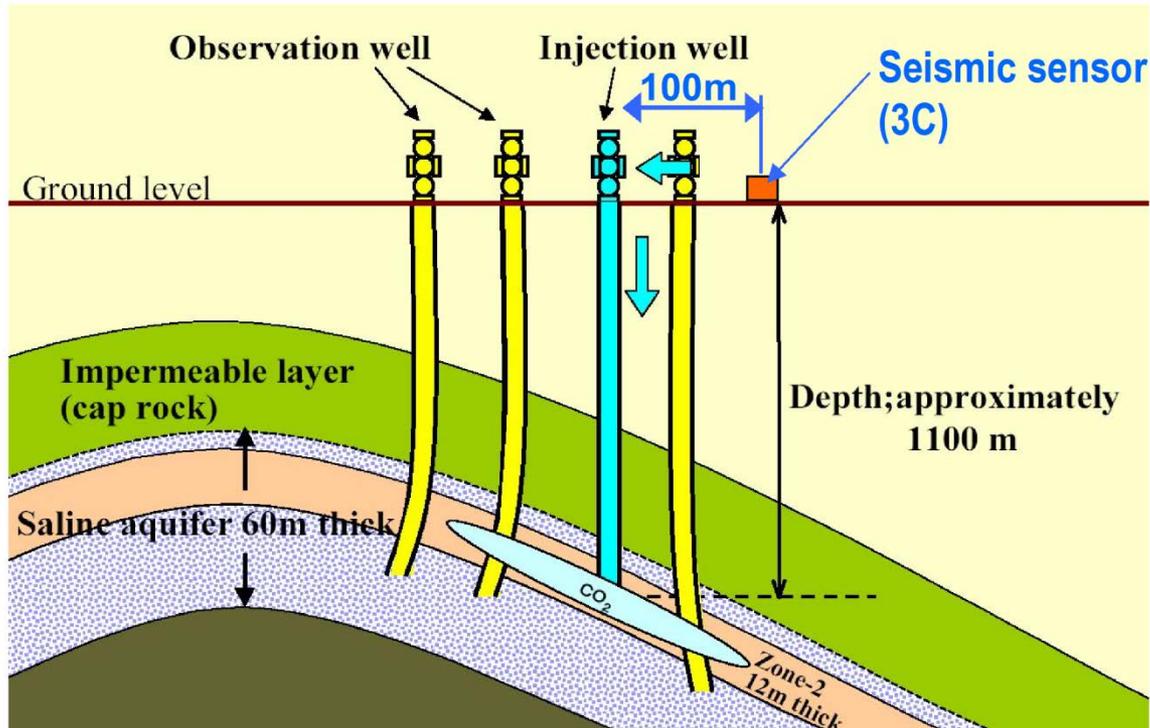
Earthquake and Micro-Earthquake Comparison

(微小地震/微小振動)

Magnitude	Equivalent TNT Radiated Energy	Energy Comparison
+3	480 kilograms	Large potash mine earthquake
+2	15 kilograms	Small potash mine earthquake
+1	480 grams	10 ton trucks collide
0	15 grams	Jump off a tall building
-1	0.5 gram	30-30 rifle bullet
-2	15 milligram	Drop a large dictionary
-3	0.5 milligram	Break a small stick

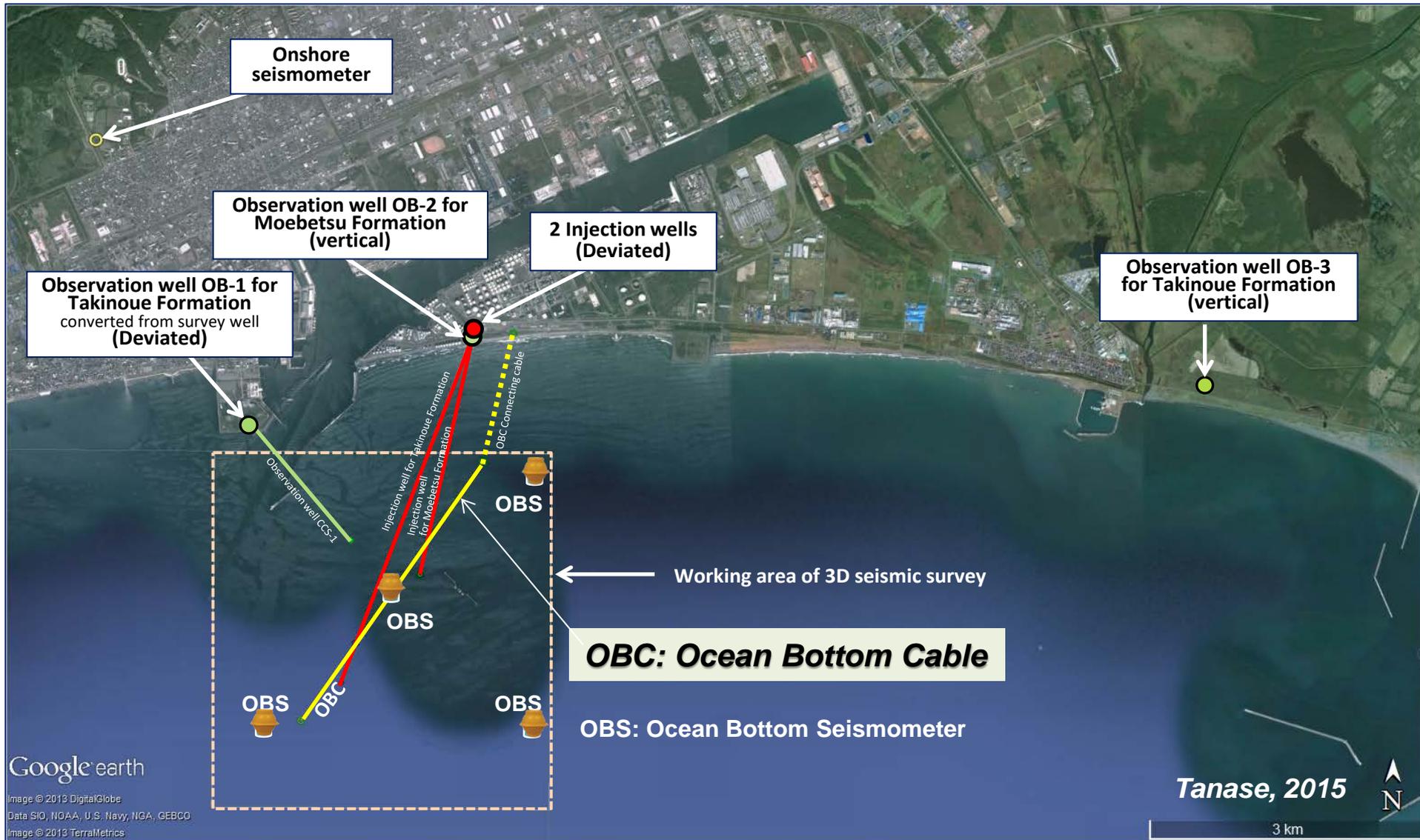
Red = Weyburn CO₂ injection micro-earthquake sizes

Microseismic Monitoring at Nagaoka Site



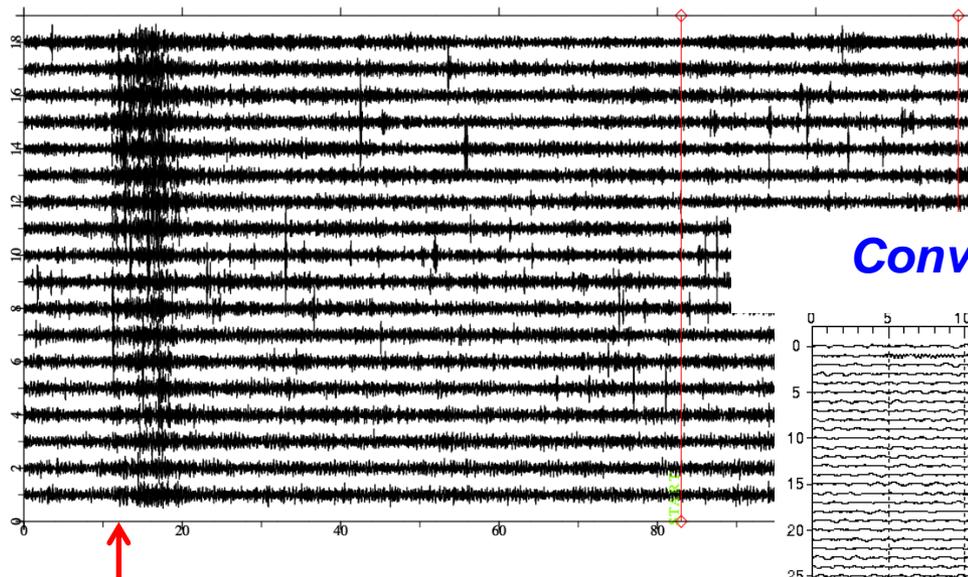
長岡実証試験サイトにおける微小地震観測
(CO₂圧入: 2003.7 – 2005.1、約1万トン)

A Dense Microseismic Monitoring Network @Tomakomai



Microseismicity ($M < 1$) detected by OBC and Conventional seismometer @ Tomakomai

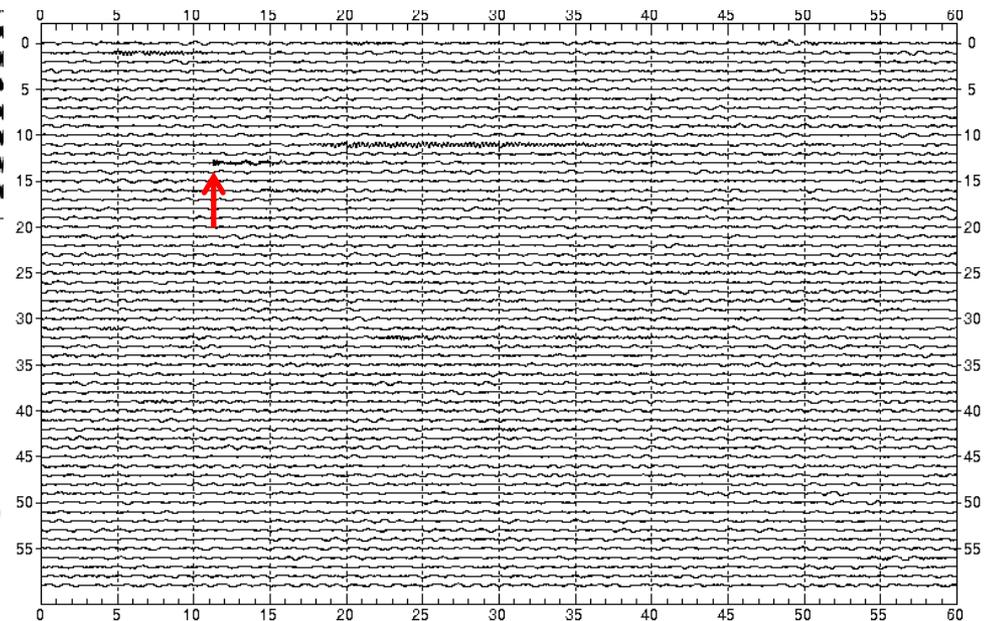
Z : 2014/07/07 03:13:03 [Dur. 120.0]



OBC Record

自然地震記録の一例

Conventional Seismometer Record

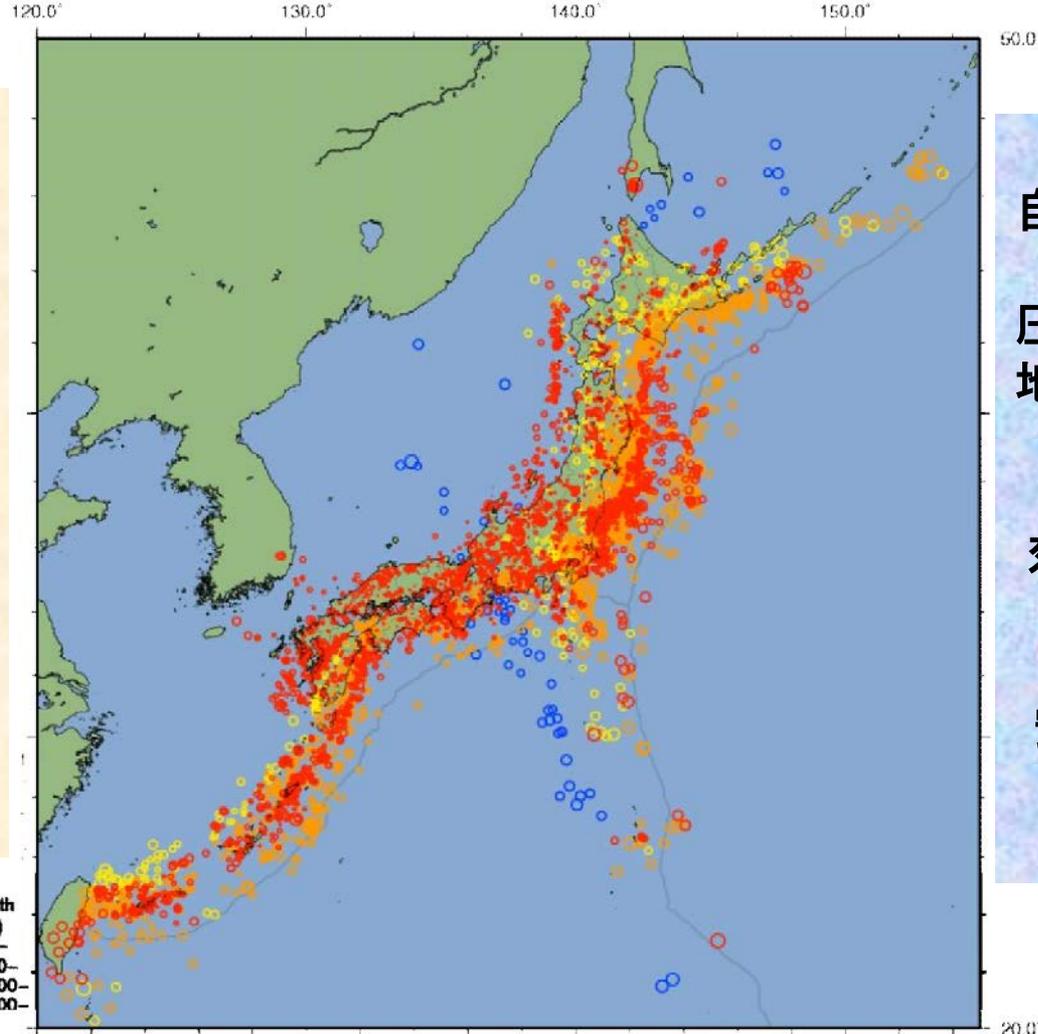


“Two birds (2D/3D Seismic, Microseismic) with one stone (OBC)”

気象庁 | 地震月報(カタログ編)

震央分布図 2017年04月

震源



自然地震が多い！

2017.4以降
地震月報が未公開

圧入サイト周辺では
震源決定精度向上
が欠かせない

自動処理・省力化

圧入サイト周辺の
地震カタログ整備

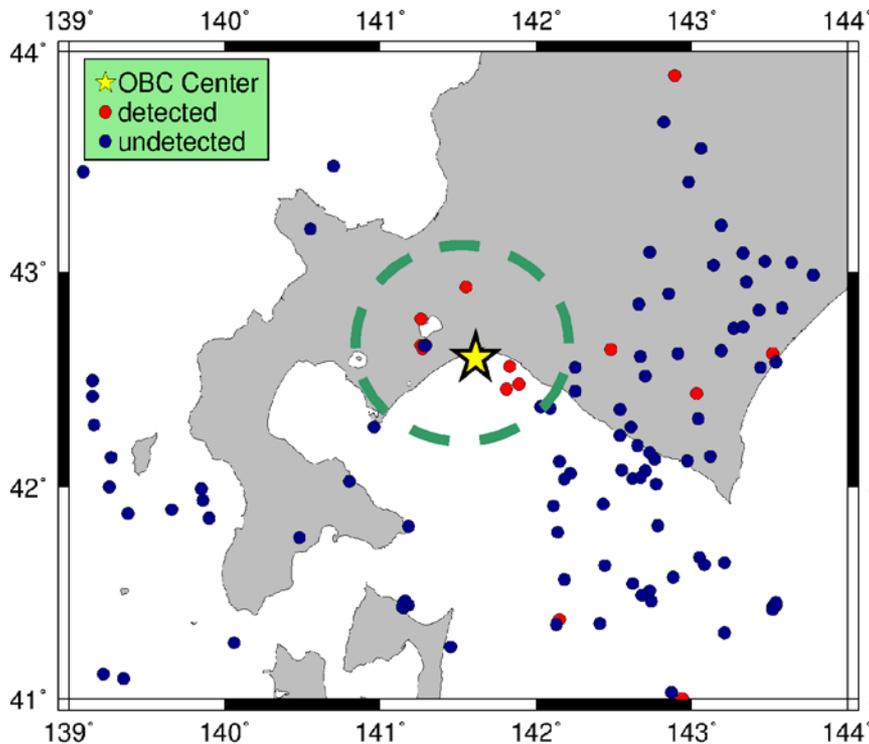
観測・解析結果を
効果的に公開及び
有効活用

安全管理、不安や
疑念の解消へ

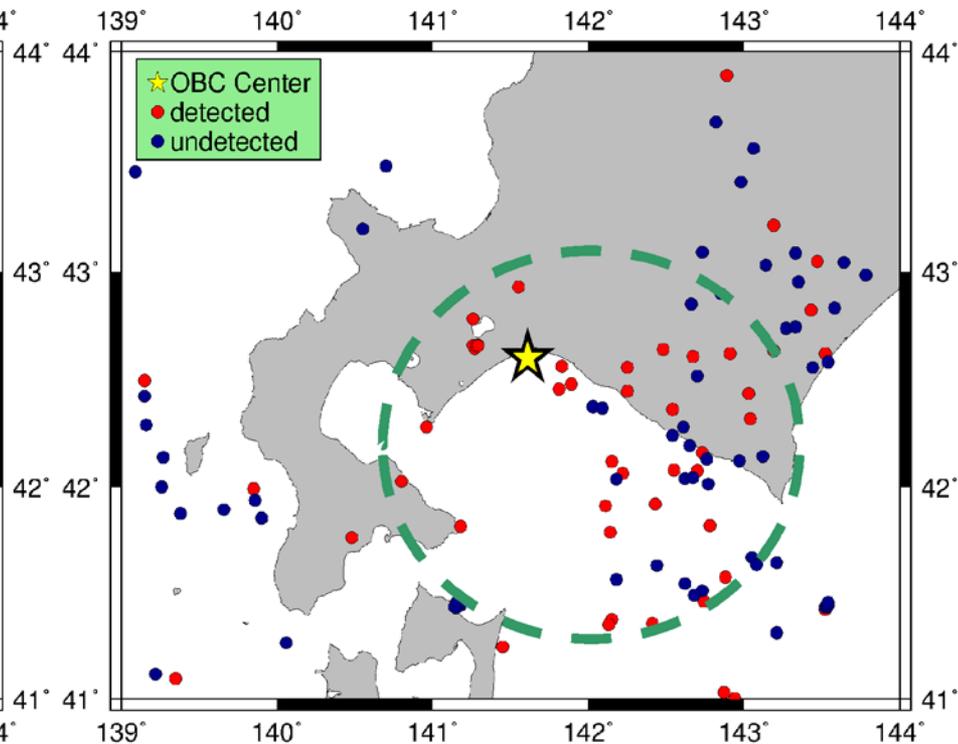
圧入サイト周辺:どこまでの範囲？

OBCの観測データからイベントを効果的に検出

STA/LTA



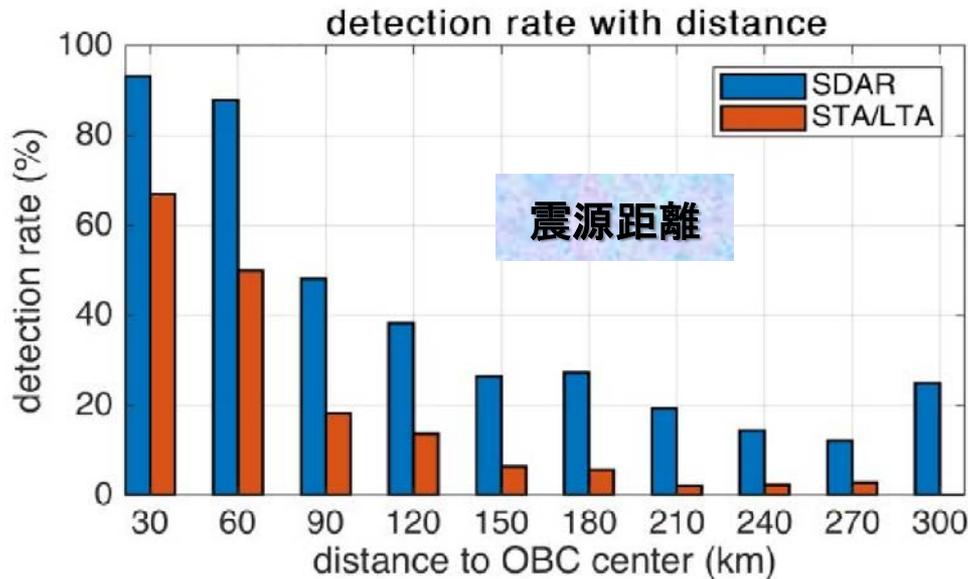
SDAR



圧入前の自然地震の観測データ： 2015.02.01 -- 2015.02.28

従来のSTA/LTA法と新しいSDAR法の有効性の検証

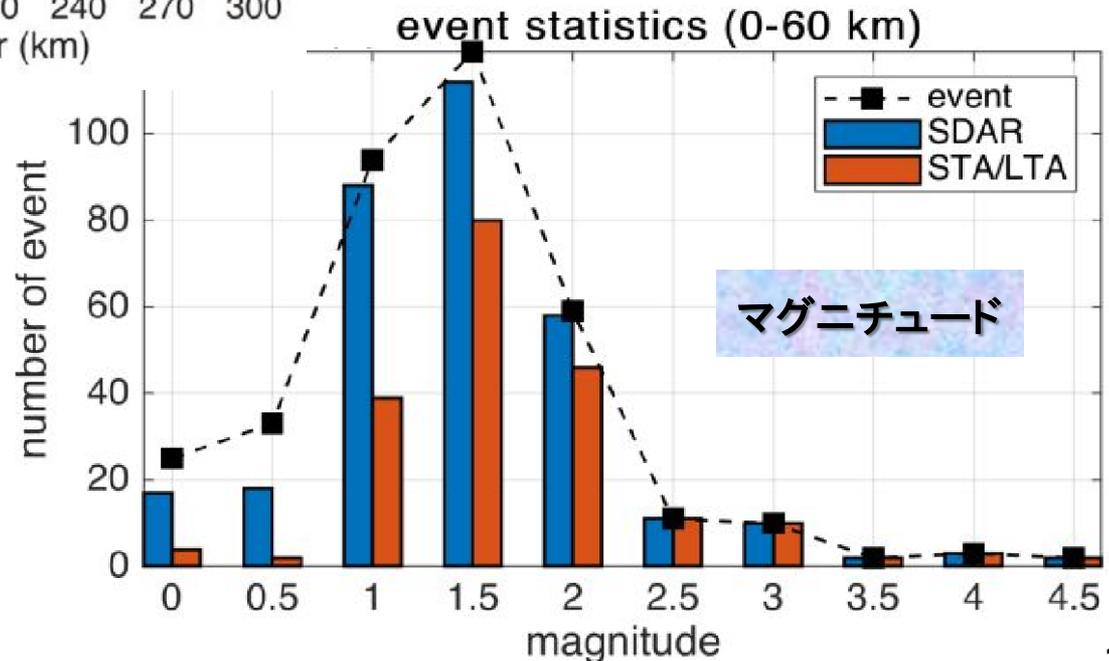
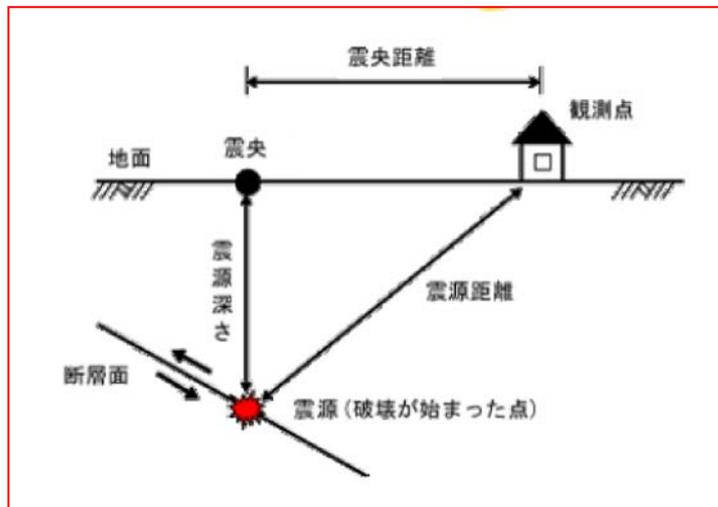
SDAR and STA/LTA on OBC data (2015.02-2016.01)



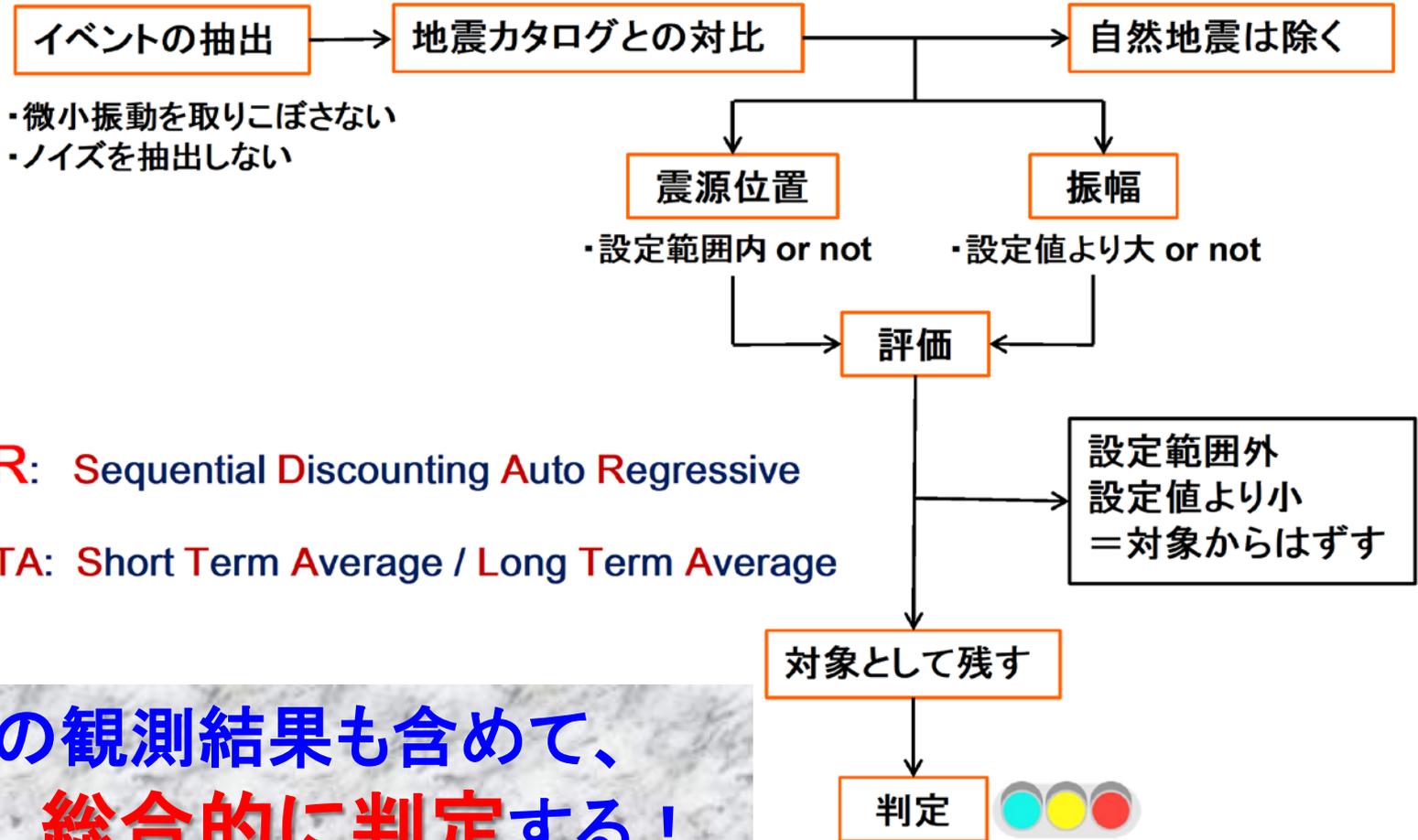
Natural earthquake hypocenters come from:

Japan Meteorological Agency (JMA)

<http://www.data.jma.go.jp/sv/d/eqev/data/bulletin>



ATLSにおける観測データ解析フロー



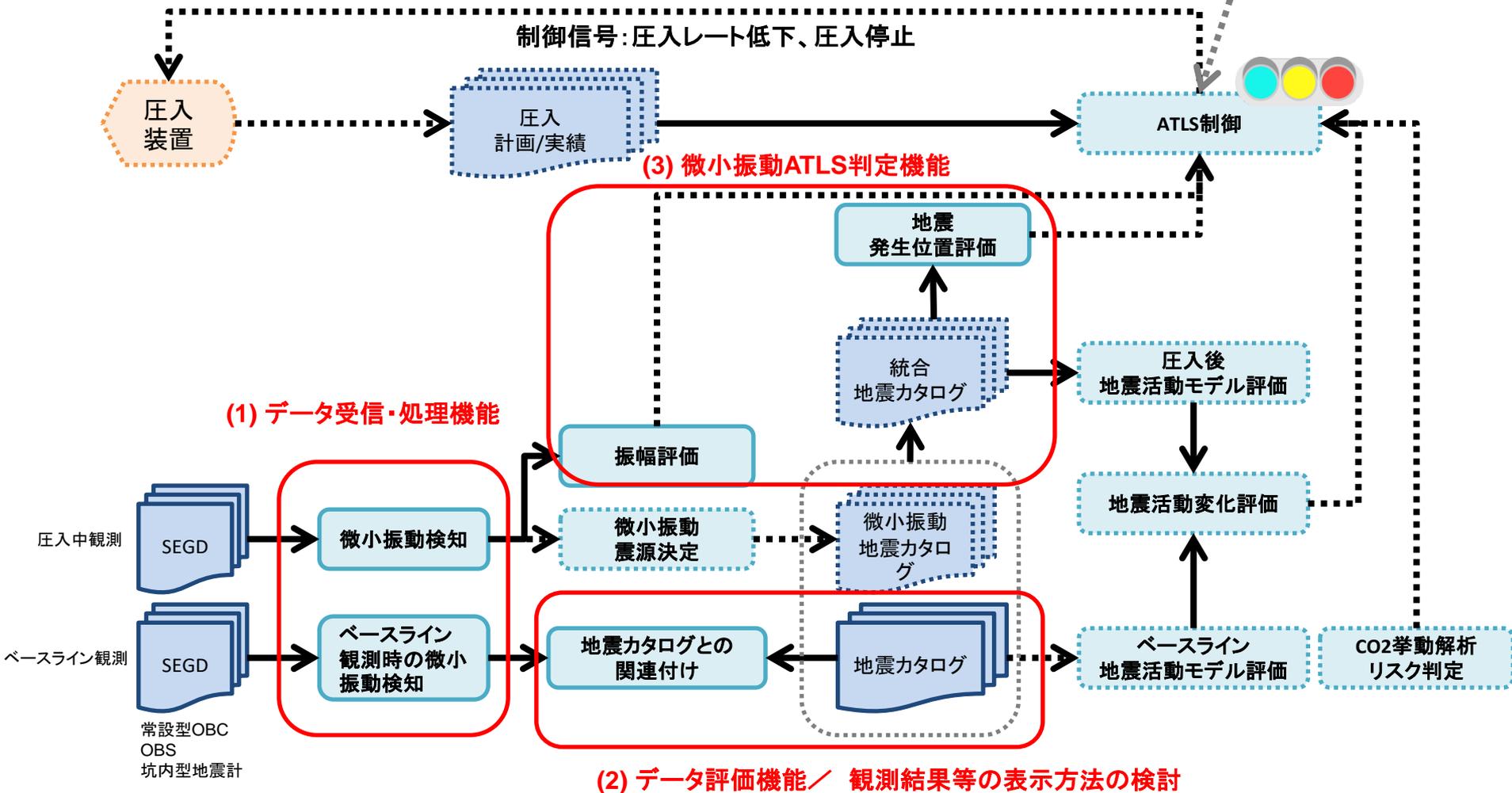
SDAR: Sequential Discounting Auto Regressive

STA/LTA: Short Term Average / Long Term Average

他の観測結果も含めて、
総合的に判定する！

ATLSの主なシステム構成 (動作確認中)

ATLS状態変更
(人間による判断)
※圧入再開、圧入レート低下で再開

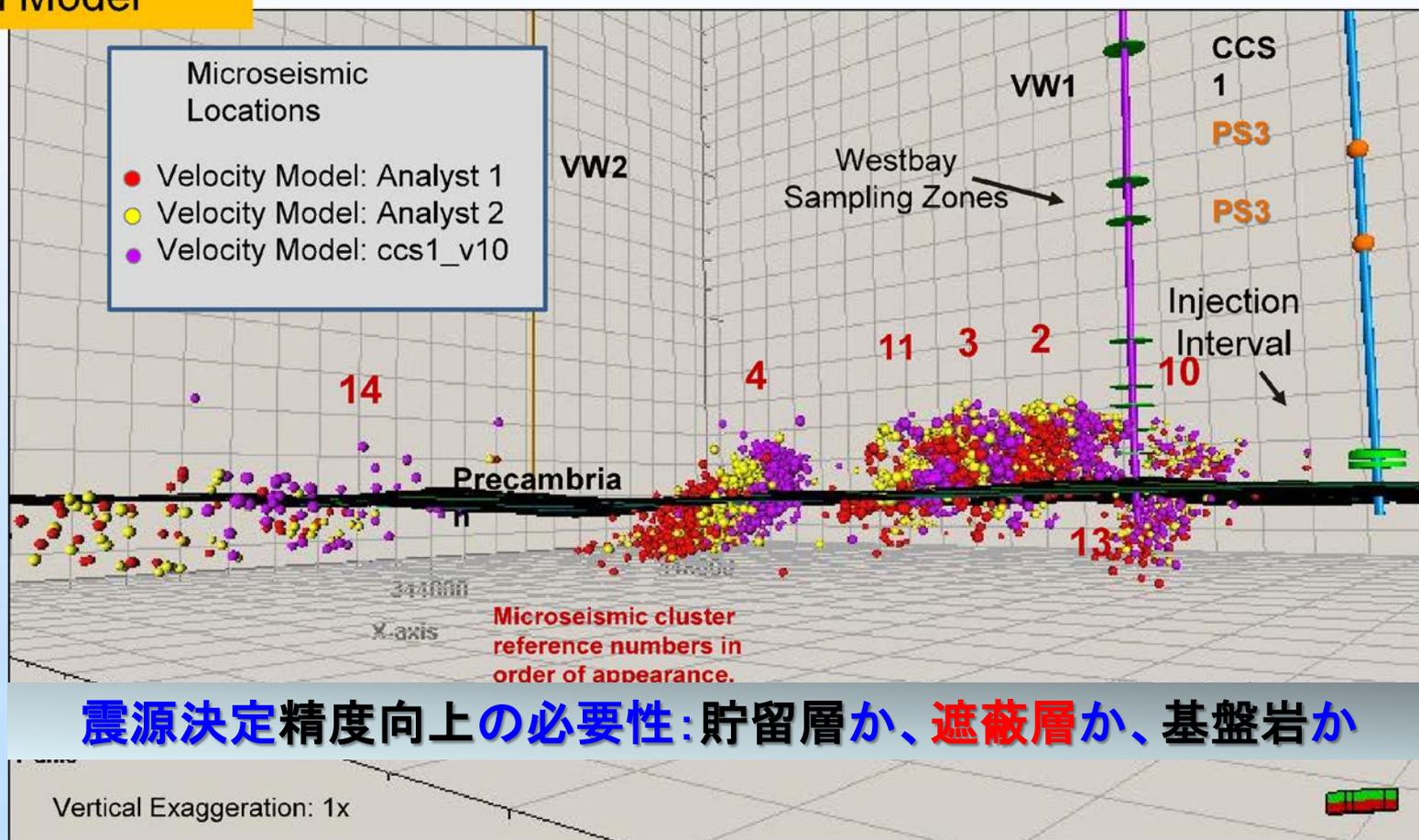


ATLSシステムの完成に向けて

- 気象庁の地震観測情報(データベース)を活用して、解析対象イベントの絞り込み
- 信号機の色(判断基準)や圧入再開条件等の検討
(他分野の事例や知見を参照)
- 圧入サイトにおいて、**どの範囲**(Area of Review)まで重点的に監視するか
- 圧入時の観測データを有する海外機関との協力
- Science-basedのリスクコミュニケーション
(社会的受容性向上の手法論からの転換)

Microseismic Velocity Modeling: 2013 Addition of Anisotropy

Inject, Monitor,
and Model



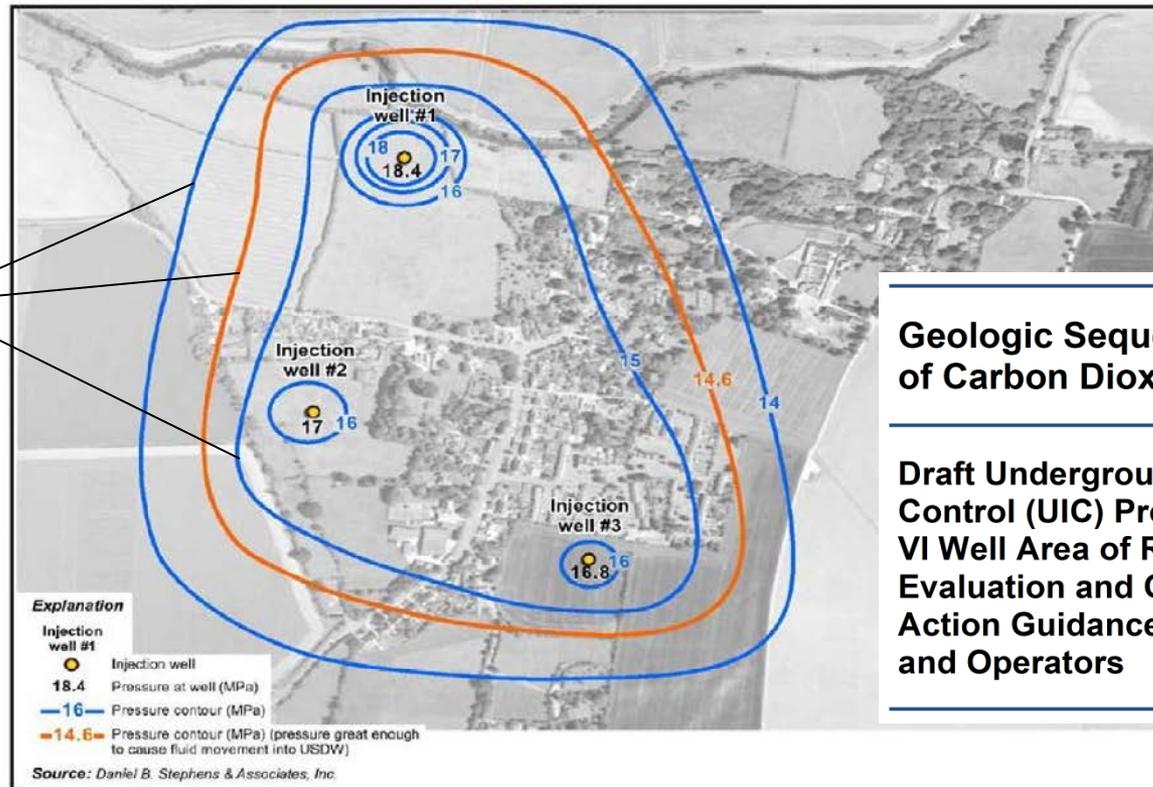
Microseismic Events at Decatur, Illinois

圧入サイト周辺の地震観測： どこまでの範囲？



Area of review (AoR): The region surrounding the geologic sequestration project where USDWs may be endangered by the injection activity. The area of review is delineated using computational modeling that accounts for the physical and chemical properties of all phases of the injected carbon dioxide stream and displaced fluids, and is based on available site characterization, monitoring, and operational data as set forth in §146.84.

地質モデルを用いた
数値解析結果



Geologic Sequestration
of Carbon Dioxide

Draft Underground Injection
Control (UIC) Program Class
VI Well Area of Review
Evaluation and Corrective
Action Guidance for Owners
and Operators

Figure 3-3: Hypothetical Geologic Sequestration Site: Model Predicted Maximum Pressure Within the Injection Zone

Cluster Development in Relation to Pressure Plume

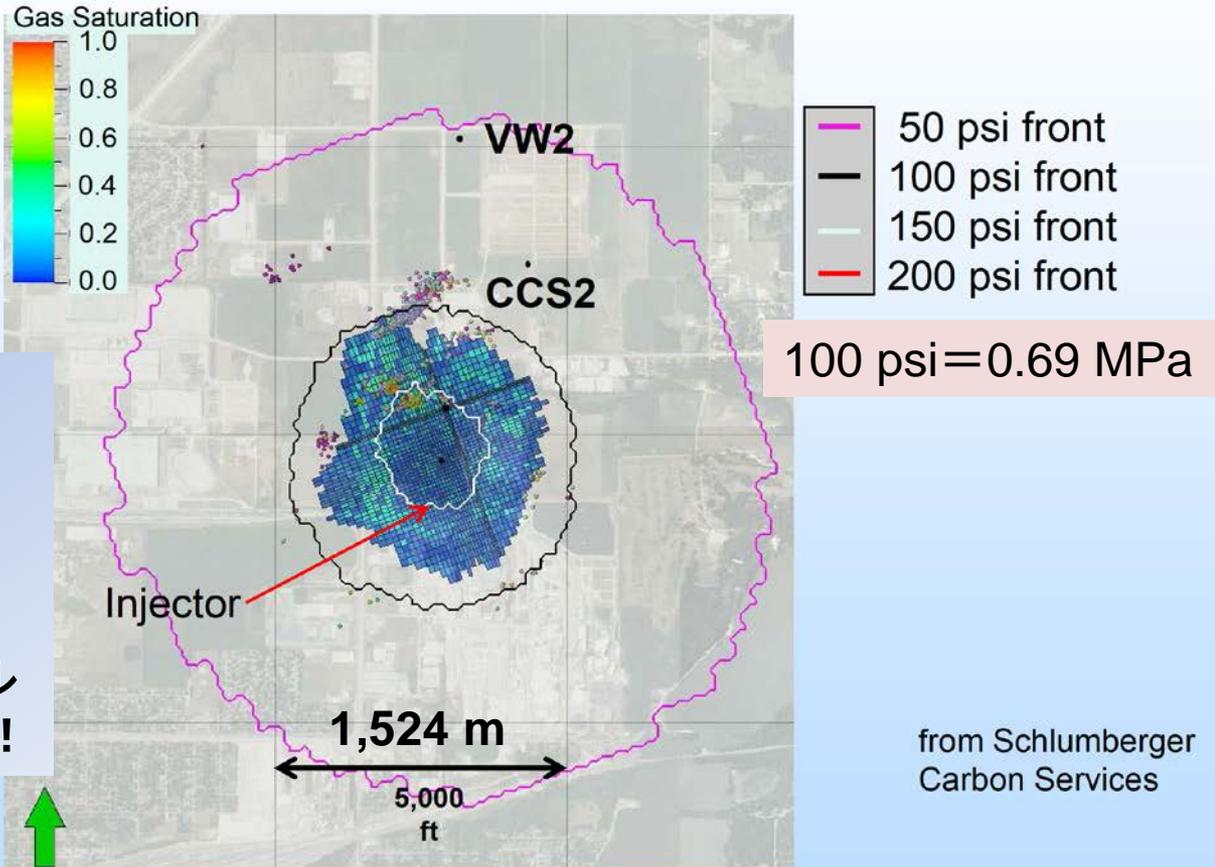
January 2013

Inject, Monitor, and Model

約100万トン圧入
終了後の予測結果



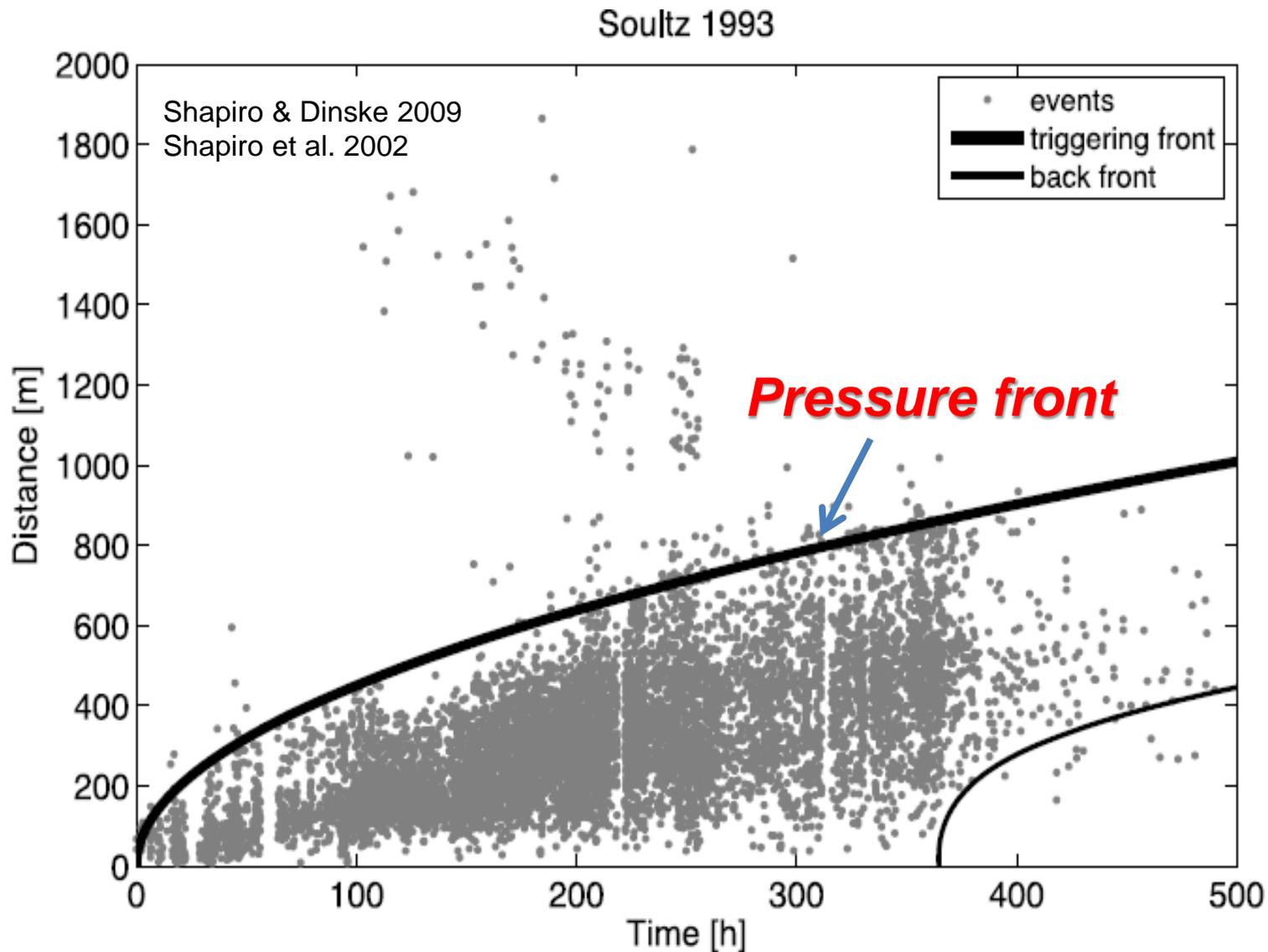
予測精度は地質モデル
の完成度に大きく依存！



S1. No Flow Barriers

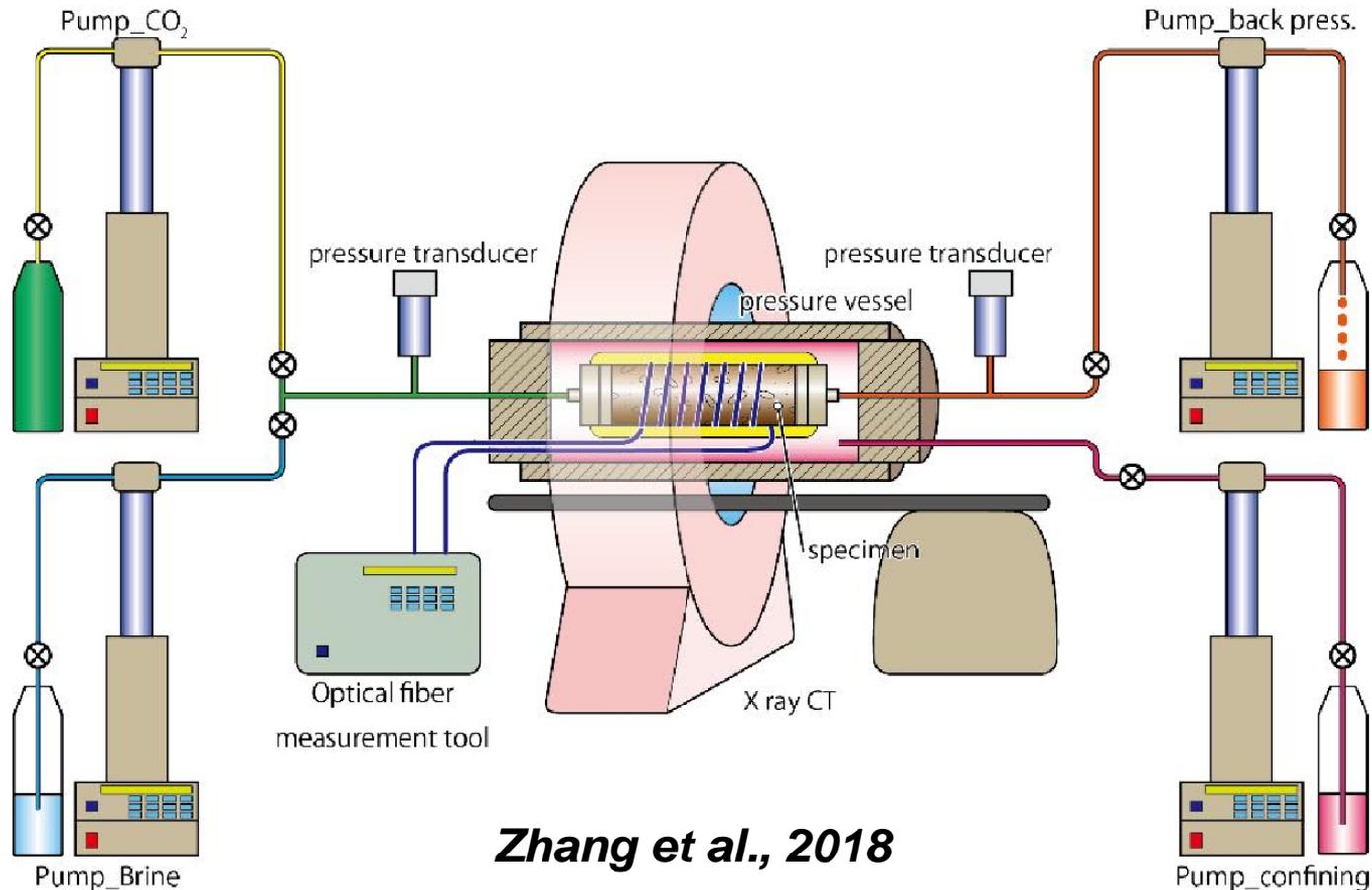
Plume and Pressure Fronts at Decatur, Illinois

事例：地熱開発における微小地震eventとpressure frontの関係



CO₂ Plume Front and Pressure Front

-- *Insights from a lab experiment* --



Zhang et al., 2018

Doi: 10.1029/2018WR023415

不均質砂岩試料を用いた流動と変形の同時測定実験

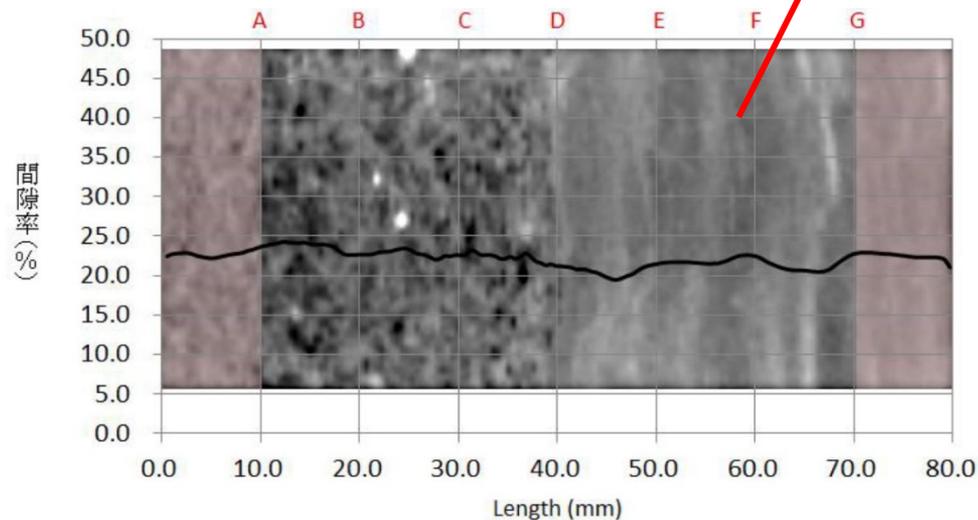


貯留層(粗粒)



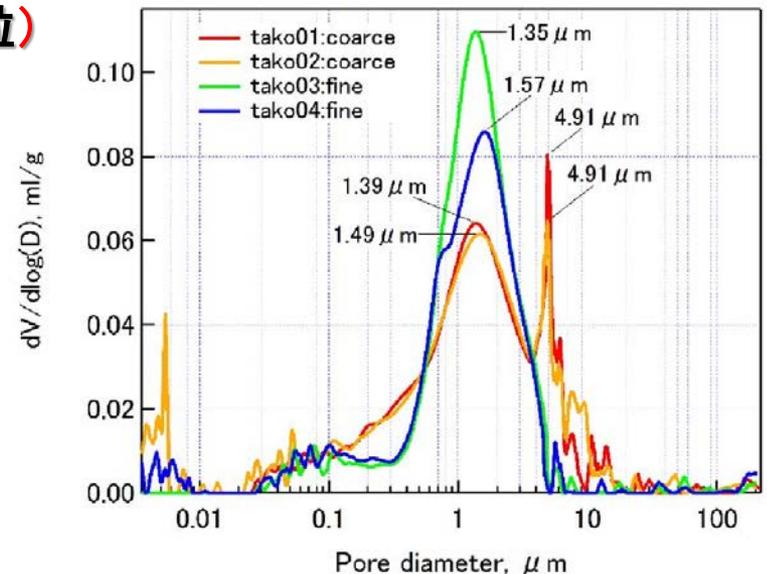
巻き付けた光ファイバー

X-CT画像



遮蔽層(細粒)

細孔分布

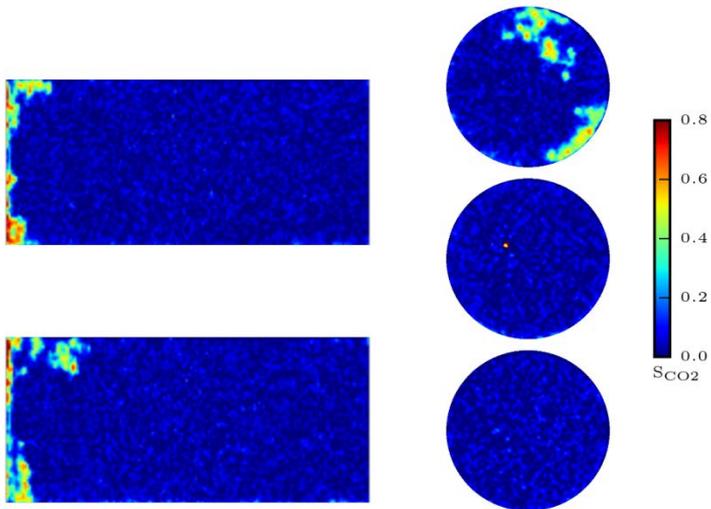


遮蔽層の安定性監視、**圧カフロント**の観測

粗粒部(貯留層)内のCO₂分布状況(X-CTイメージ)

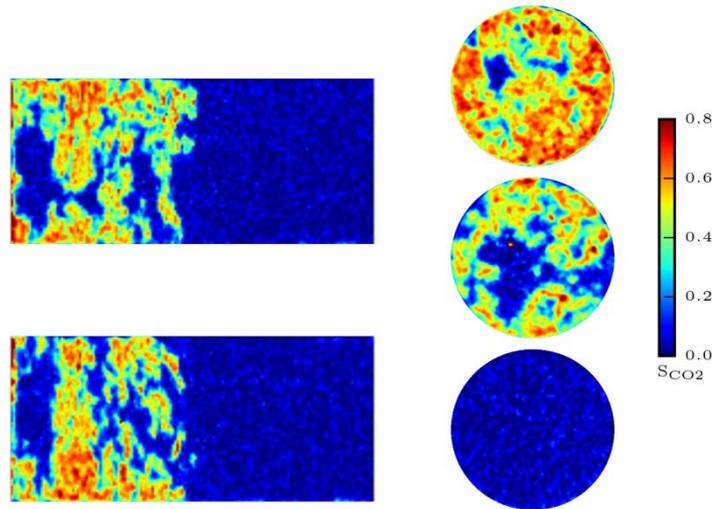
(2496, '154', '23', '170015.900', 'SCO2 = ', 0.050244590471315728)

①



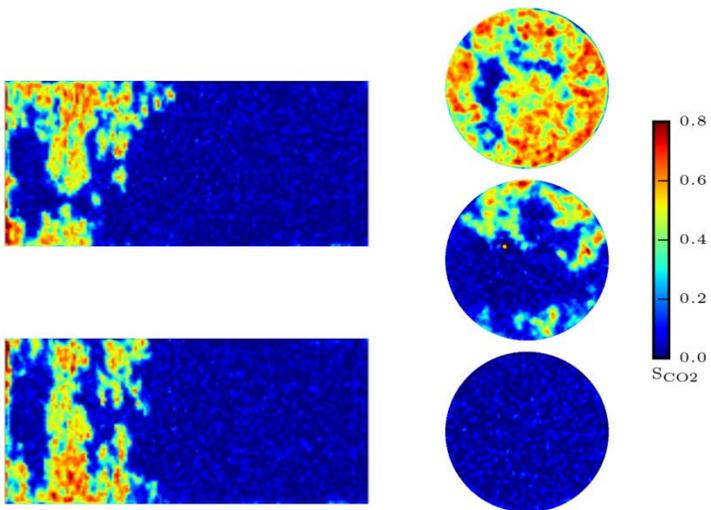
(2496, '164', '1', '165503.600', 'SCO2 = ', 0.1929406918976232)

③



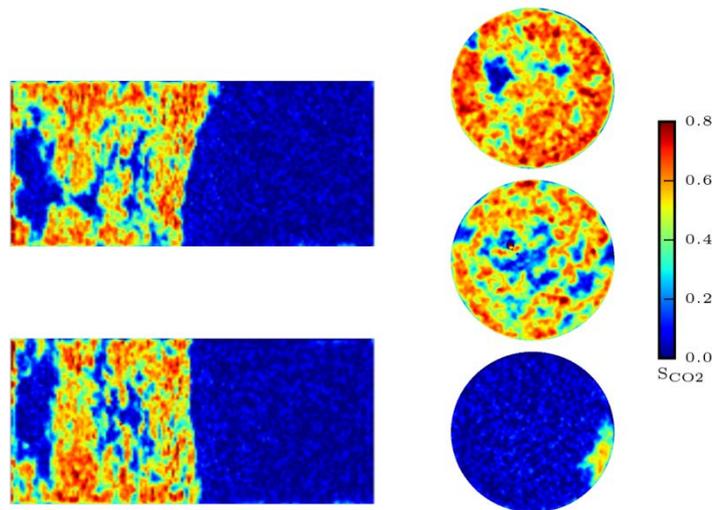
(2496, '165', '1', '084003.550', 'SCO2 = ', 0.24656524433201321)

②

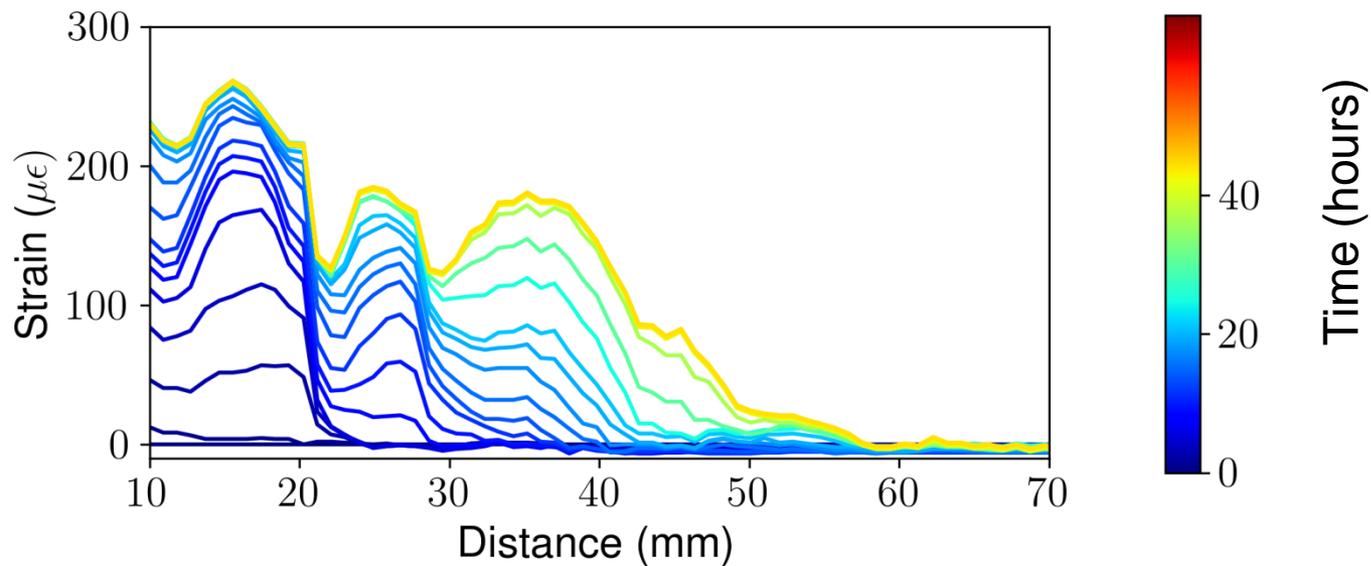
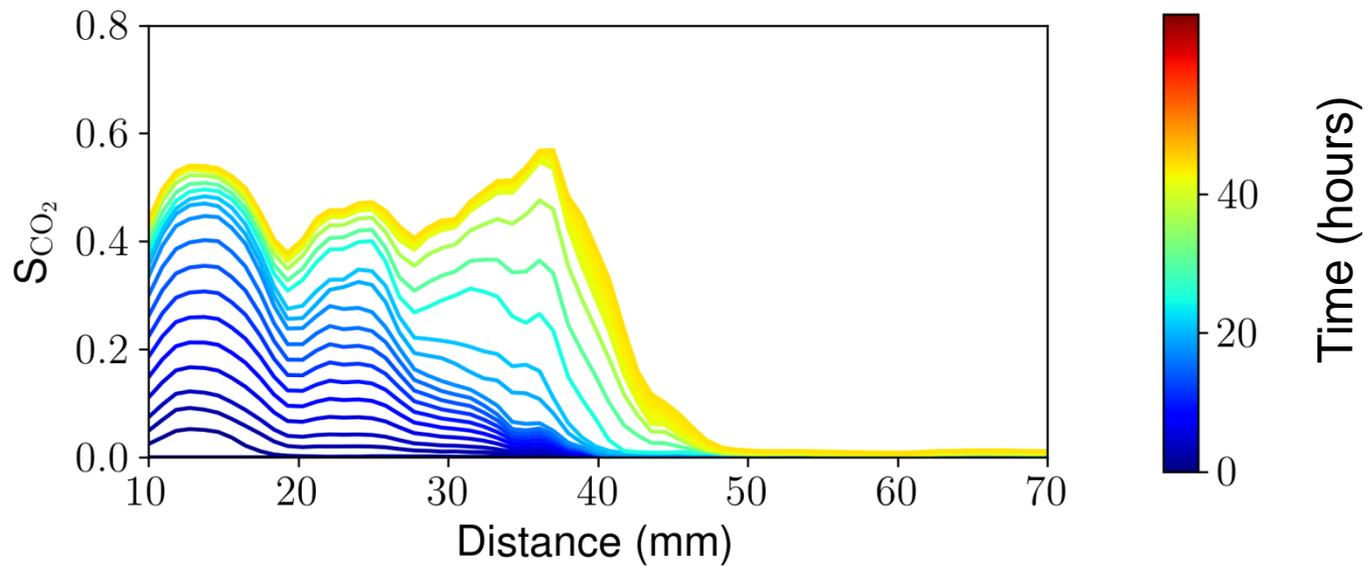


(2496, '165', '1', '084003.550', 'SCO2 = ', 0.24656524433201321)

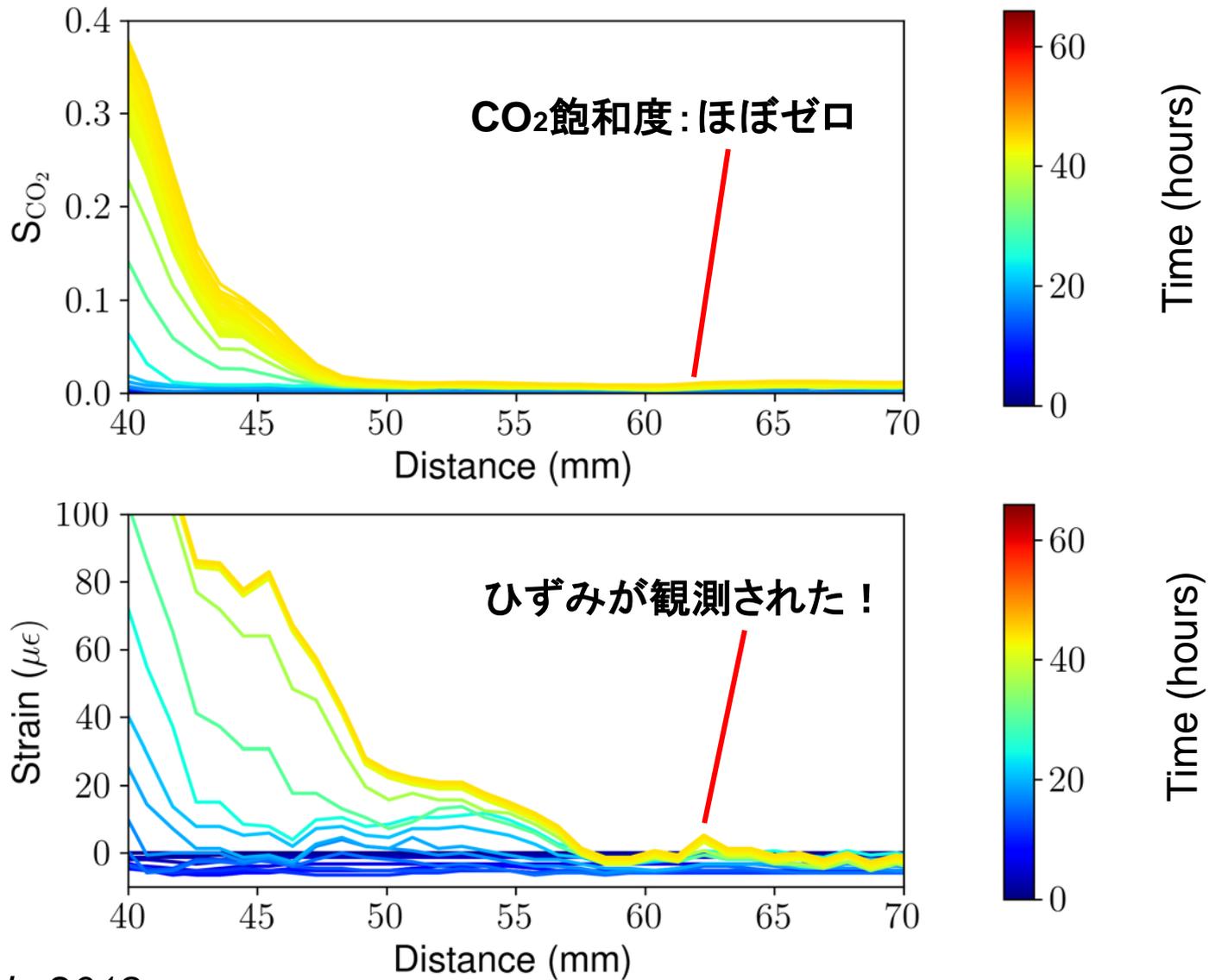
④



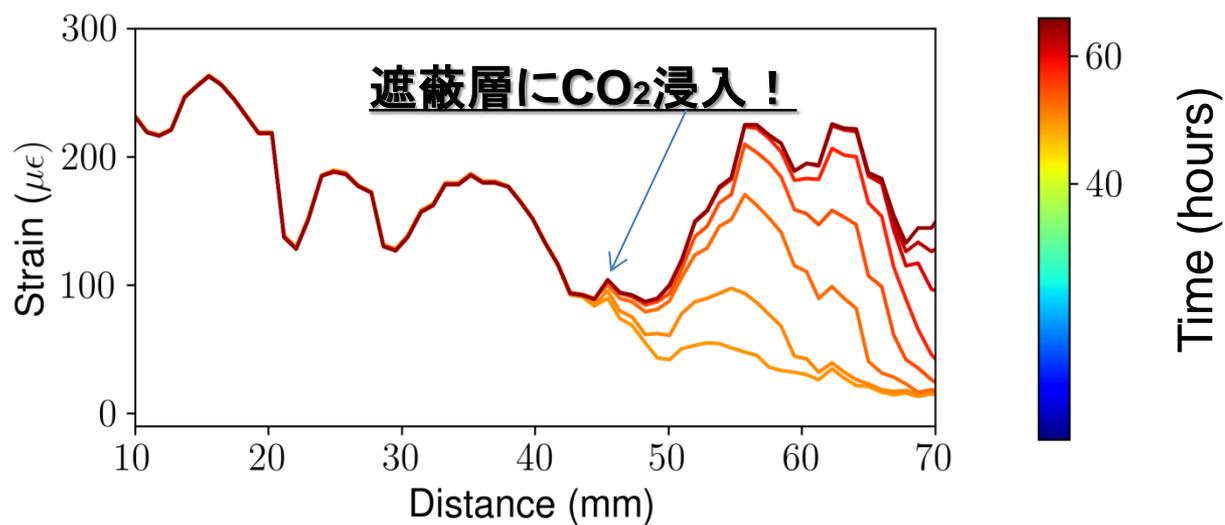
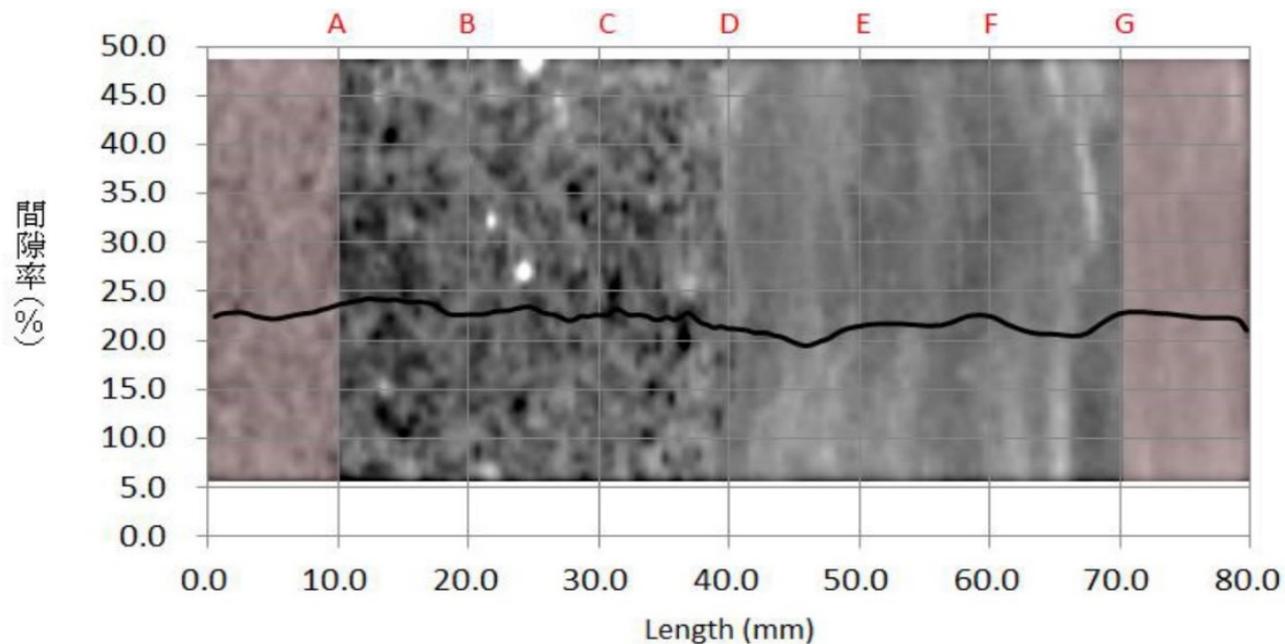
粗粒部(貯留層)におけるCO₂飽和度とひずみの対応関係

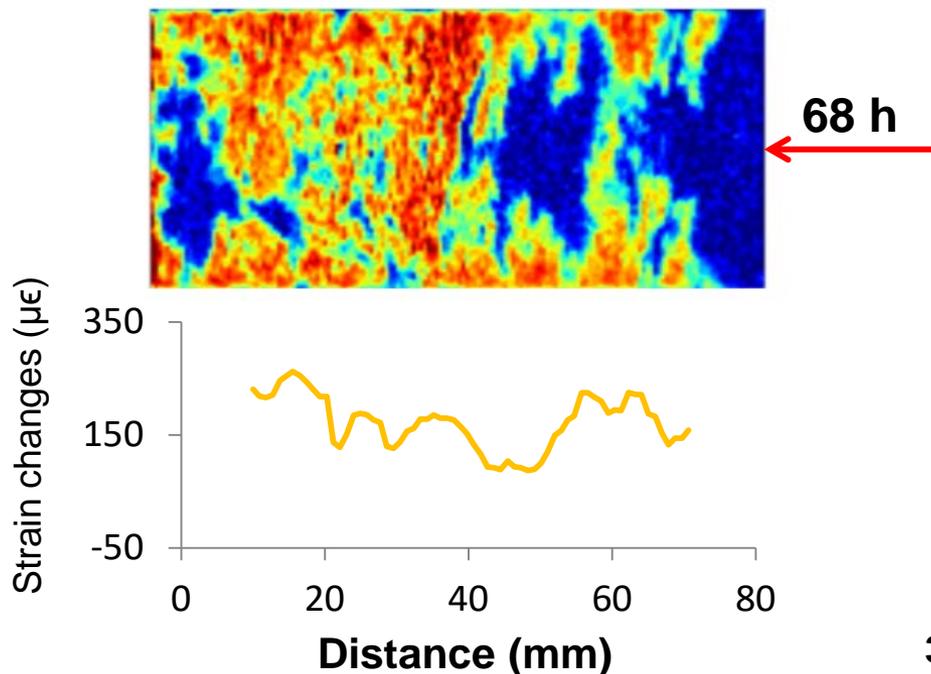
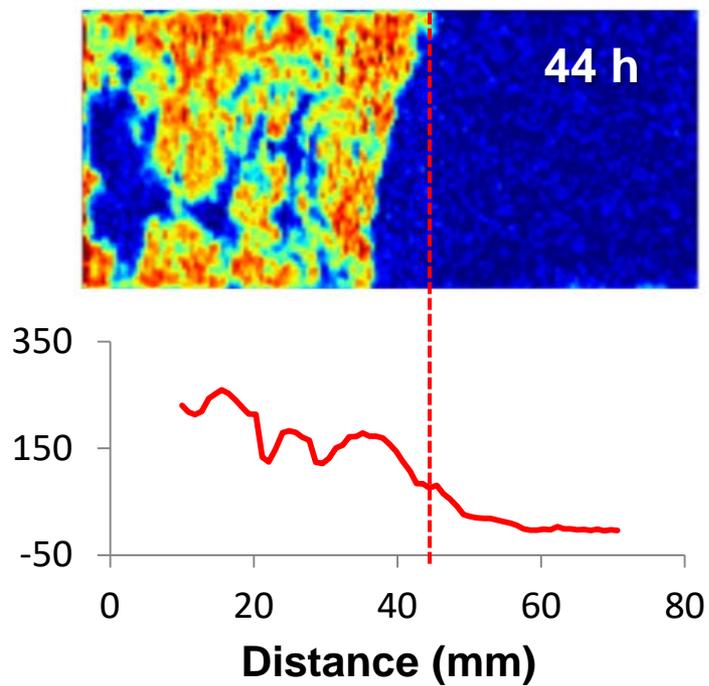
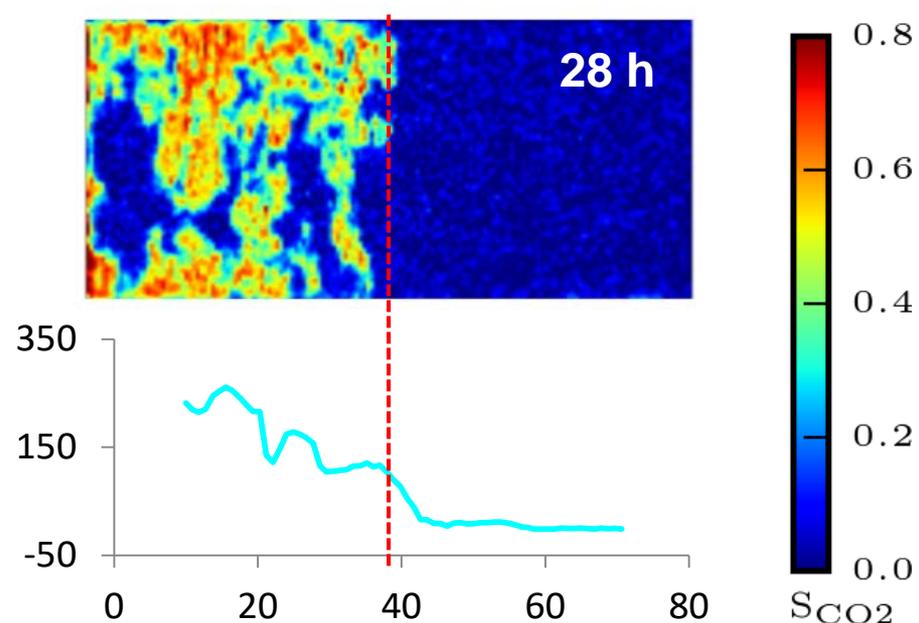
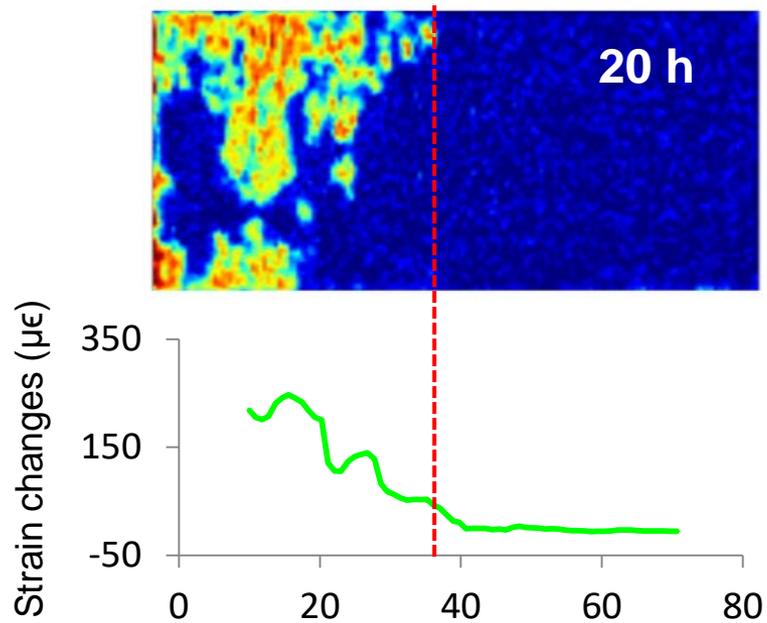


粗粒部のCO₂飽和度が増える過程で、細粒部のひずみ発生状況

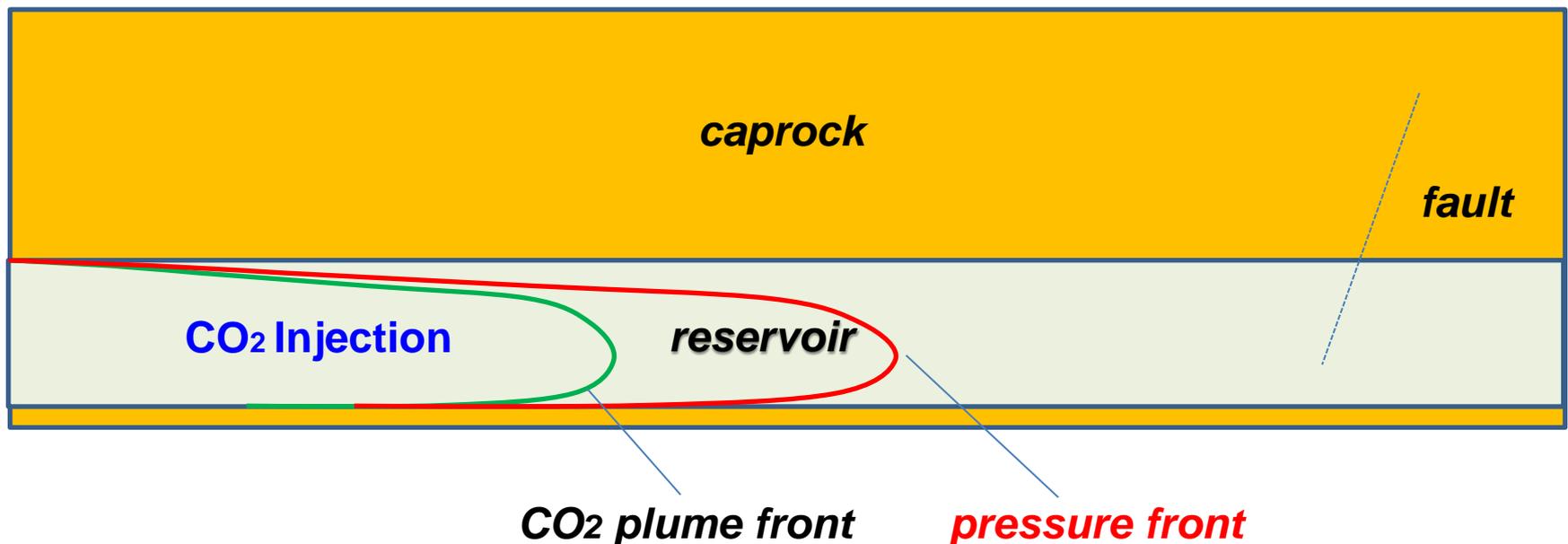


粗粒部から細粒部にCO₂浸入した後のひずみ発生状況





- 砂岩試料の測定実験結果より、*CO₂ plume front* と *pressure front* が区別できた。
- *Geomechanical simulation*より、*pressure front* と貯留層物性の関連性に関するヒストリーマッチング
- 光ファイバーによる断層安定性モニタリング(海外機関と協力も)



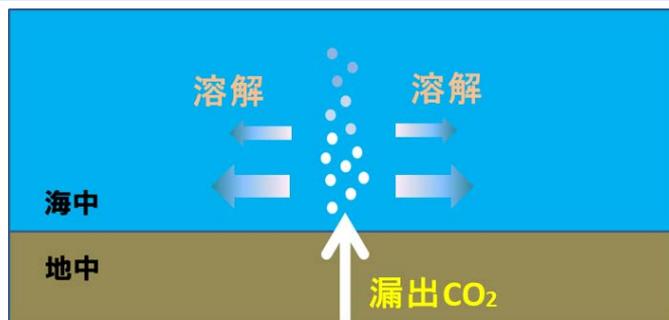
➤ 大規模CO₂地中貯留における**安全性** **向上**に向けての**リスクマネジメント**

- ✓ 海域貯留におけるCO₂漏出検知および海洋環境影響評価技術開発



報道発表資料

平成28年2月29日 | 水・環境



- 万が一のCO₂漏出に備えて

(お知らせ) 「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律第18条の15第1項に基づき環境大臣が特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄がされた海域を指定海域として指定する件」(仮称)に対する意見の募集(パブリックコメント)について

CO₂漏出検出・環境影響評価

● 万が一のCO₂漏出に備えて

－ 海域での漏出検出

- CO₂気泡検知
- pCO₂の値からの検知

－ 環境影響評価

- 漏出CO₂の海中拡散シミュレーション
- CO₂濃度上昇による海洋生物影響データベース

✓ 社会受容性の向上

- ✓ CCS事業における実用性(海洋汚染防止法対応)

H32: 総合システム開発が完成

→→ 苫小牧観測への実適用

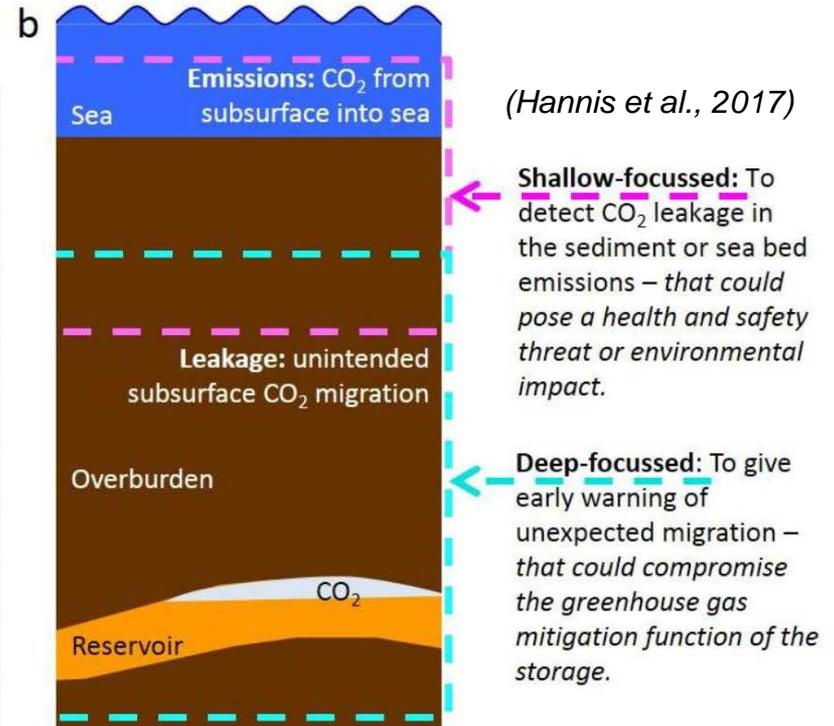
(検出基準見直し、海防法への対処)

➤ 異常値の検出、異常の原因特定、漏出の環境影響評価

Spatial coverage for large monitoring areas: shallow emissions detection

a

		OSPAR	EU Directive	EU ETS	
Shallow-focused monitoring actions	Verification of no leakage	✓	✓		Containment
	Leakage detection	✓	✓		Containment
	Emissions quantification	✓		✓	Contingency
	Environmental impacts	✓	✓		Other
	Testing remedial actions		✓		Contingency
Deep-focused monitoring actions	Migration in overburden	✓	✓		Containment
	Containment integrity	✓	✓		Containment
	Migration in reservoir		✓		Conformance
	Performance testing, calibration and identification of irregularities	✓	✓		Conformance
	Calibration for long-term prediction		✓		Conformance
	Testing remedial actions		✓		Contingency



➤ 法規に対して、

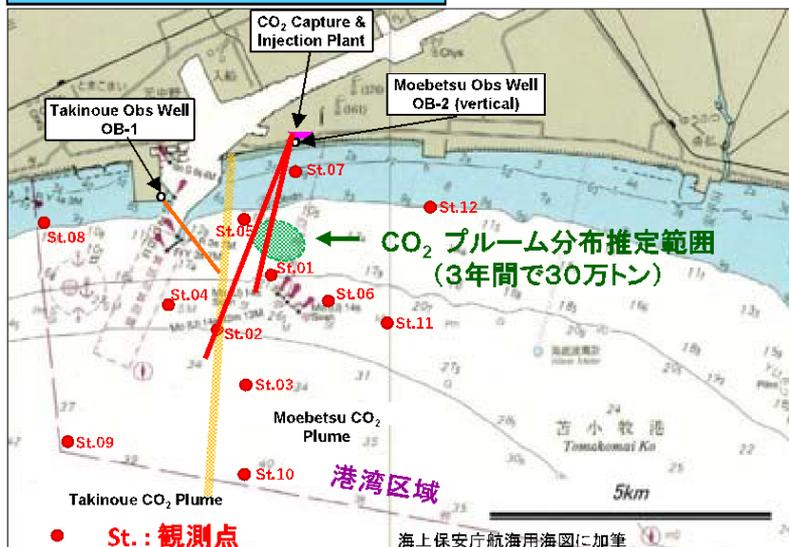
Deep-focused Monitoring (**Early Warning** of Unexpected Migration),

Shallow-focused Monitoring (**CO₂ Leakage Detection**)

海洋環境調査@苫小牧実証試験サイト

国際条約であるロンドン条約1996年議定書を反映した「**海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律(海洋汚染防止法)**」に則り、海洋環境調査の実施が求められている。

海洋環境調査地点

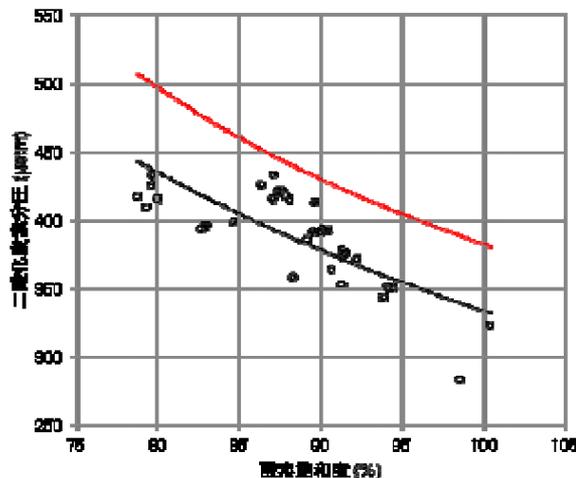


◆ 海水の化学分析に基づく移行基準(環境省指導)

- 観測点: 8測点(12測点中、沿岸4測点を除く)が対象
- 自然変動の基準の算出: ベースライン調査(H25年8月~H26年5月)で得られた底層(海底面上2m)の酸素飽和度(%)と二酸化炭素分圧(μatm)との累乗近似曲線
- 上側95%予測区間を超えた観測値が得られた場合は監視段階に移行

通常時監視 ⇒ 確認調査 ⇒ 懸念時監視 ⇒ 異常時監視

(澤田, 2018)



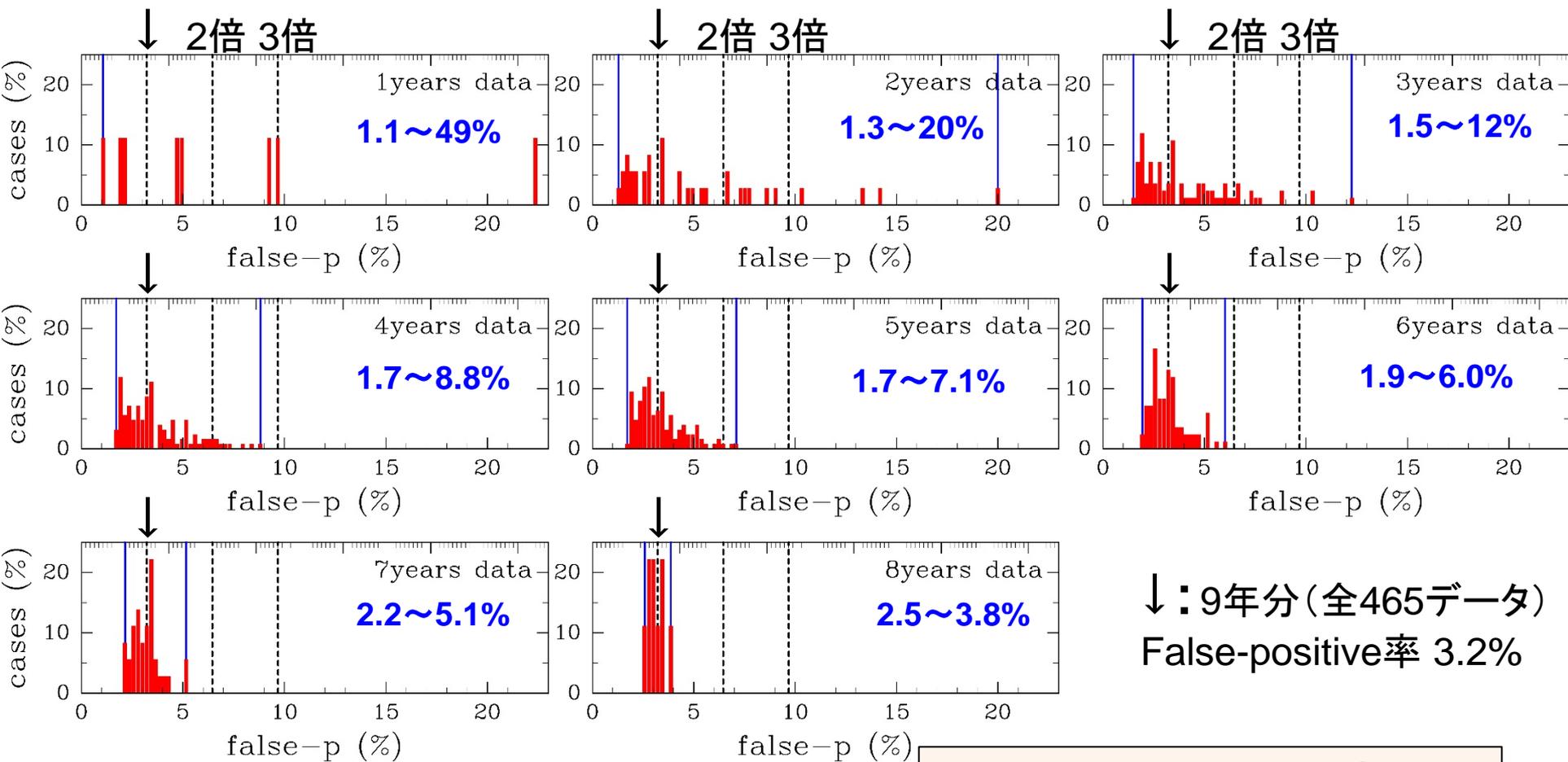
- ベースライン調査観測値(底層)
- 累乗近似曲線(ベースライン調査)
- 上側95%予測区間(ベースライン調査、移行基準の上限)

St.01- St.12: 観測点(採水ポイント)、年4回(四季)の採水より海中の**CO₂漏出を監視**
 海水中のCO₂分圧と溶存酸素の関係を基に、圧入前の調査より**ベースライン**を作る。

ベースライン = 自然変動範囲 <<< **何年分あれば、ベースラインになりうるか**

大阪湾海洋観測公開データを用いた pCO₂異常値検出基準作りの検討

Uchimoto et al., 投稿中



縦軸: $100 \times (\text{該当する組み合わせ数} \div {}_9C_N)$

ベースライン: 5年程度以上

漏出検出 : pCO₂異常値検出

連続観測(大阪湾) 結果速報(暫定値)

観測日数

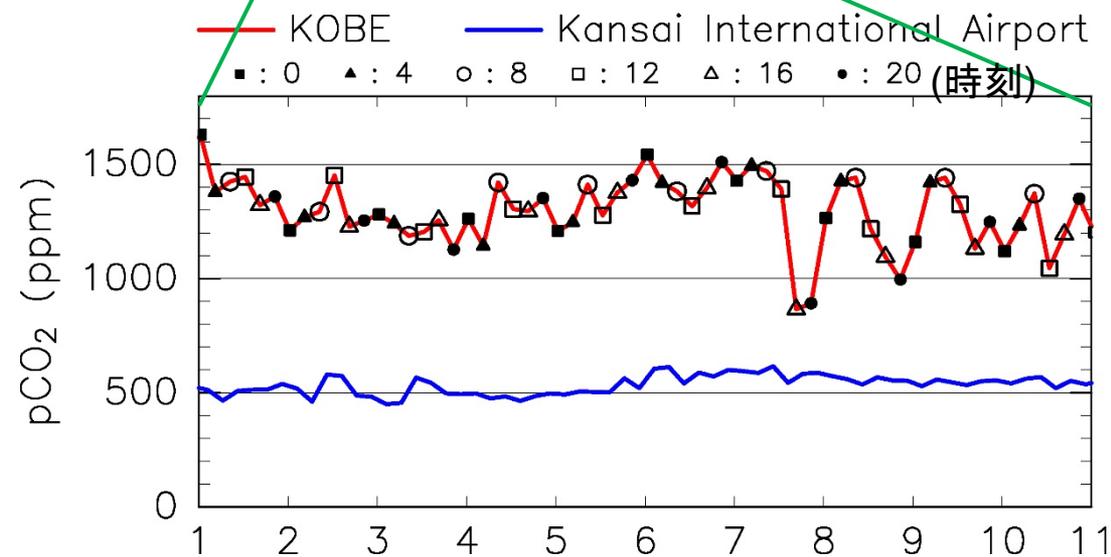
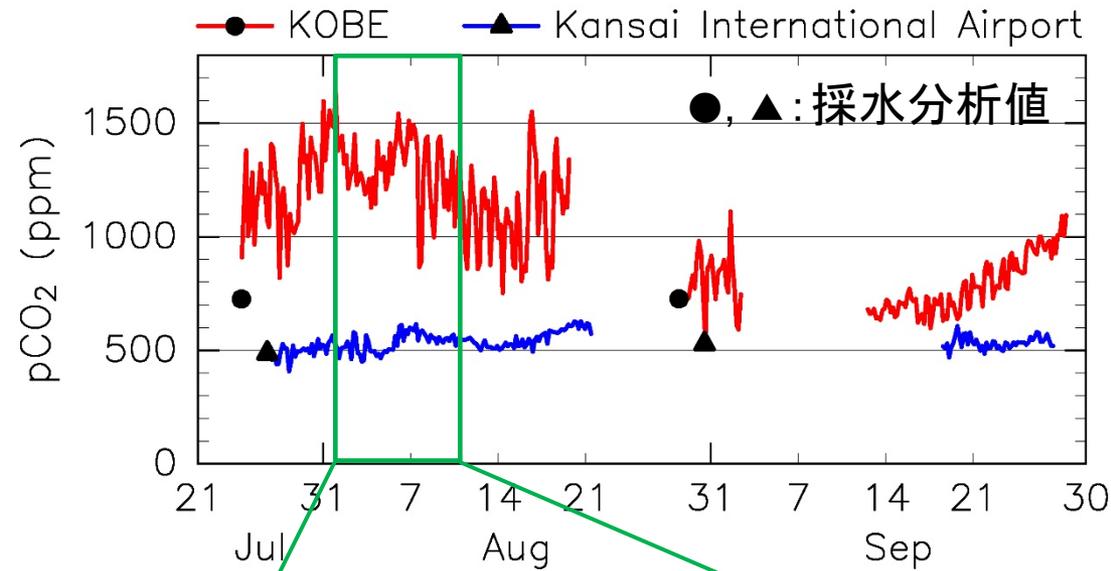
	7月	8月	9月
神戸	8日	23日	19日
関空	6日	21日	10日

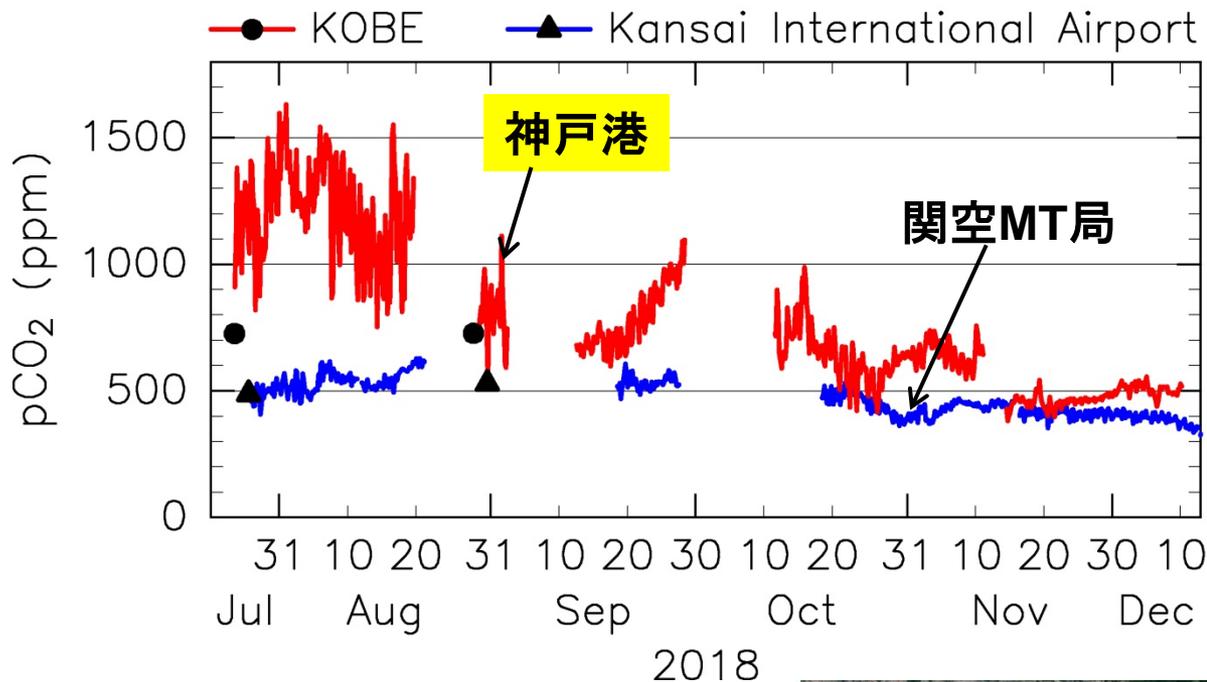
8月(21日までの)pCO₂値

神戸 : 751~1632 ppm

関空 : 407~628 ppm

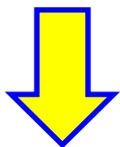
↓
四季調査(1季節に1回の調査)
では、必ずしもその海域・その季節の変動を捉えられない。



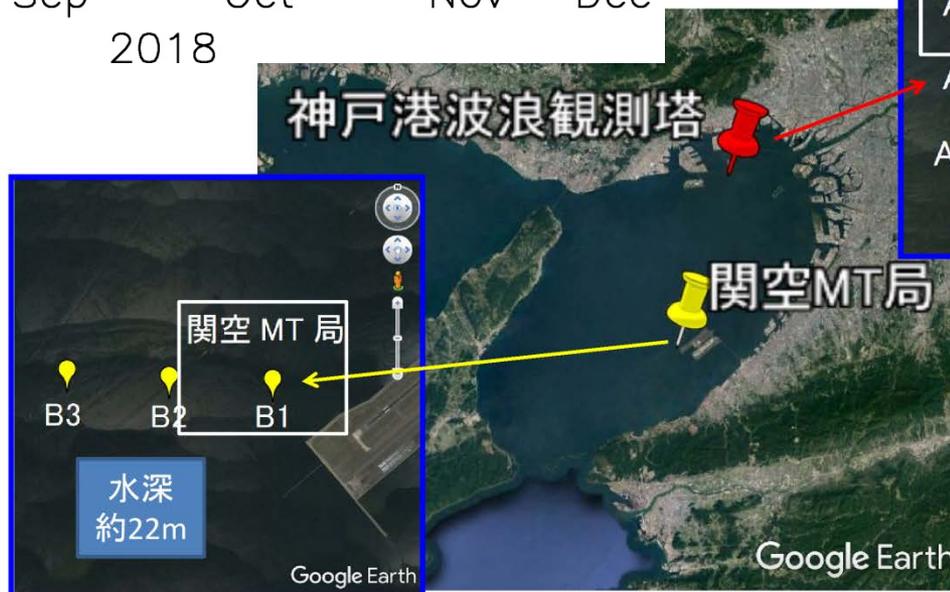


7月下旬～12月上旬
観測結果速報

連続観測結果から
四季観測の妥当性



(どこまで、年間変動を表現できているか)



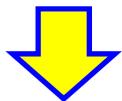
海域環境調査のあり方

CO₂漏洩(地中)・漏出(海中)検出

漏出点の特定: 音響ソナー
による漏出気泡検知
+
採水調査

貯留層から上位層
へのCO₂漏洩検出方法

検出能力
Vs
Early Warning



Remediation Plan



効果的・経済的な
調査方法を提案

Shallow-focused: To detect CO₂ leakage in the sediment or sea bed emissions – that could pose a health and safety threat or environmental impact.

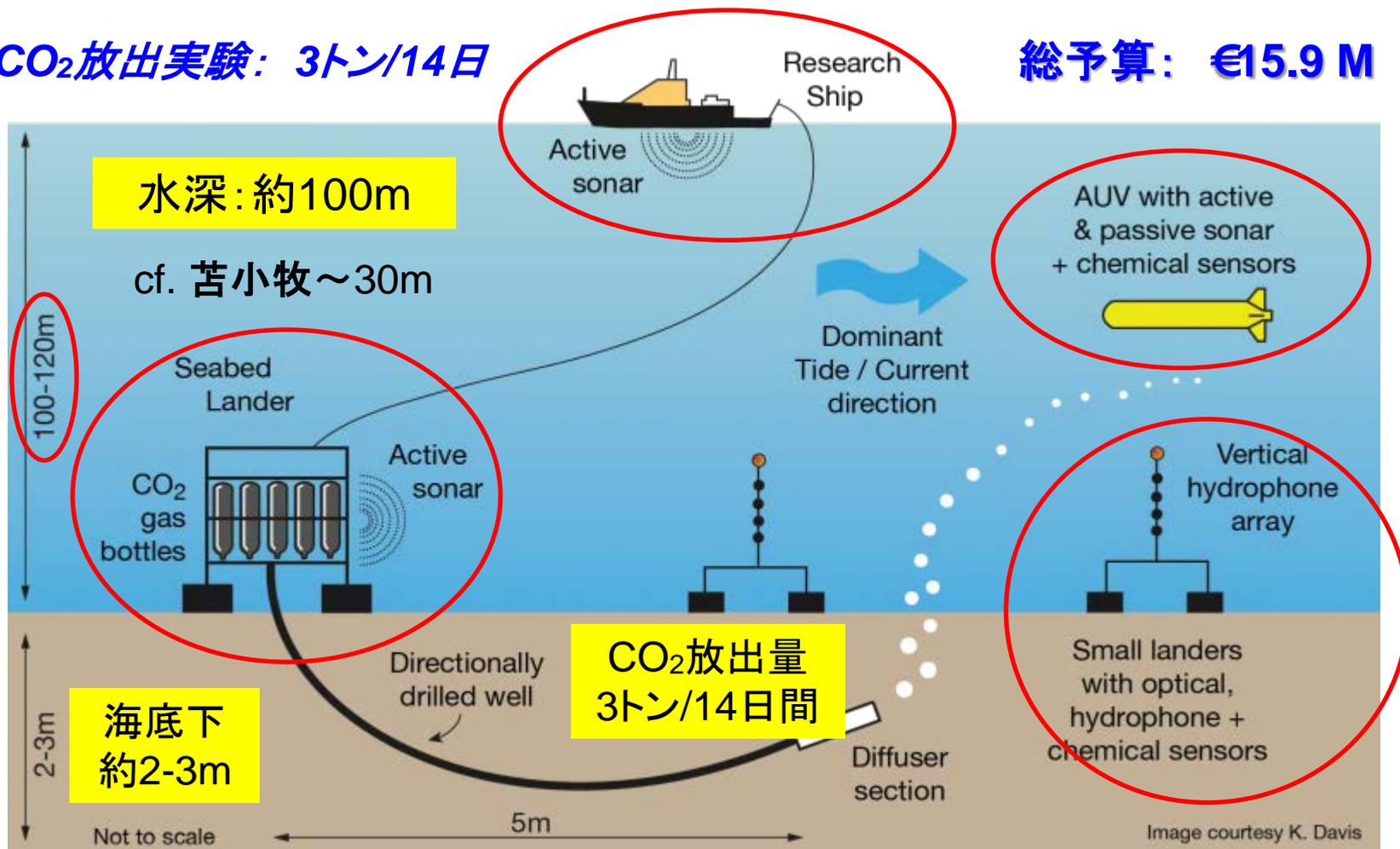
Deep-focused: To give early warning of unexpected migration – that could compromise the greenhouse gas mitigation function of the storage.

海外の実海域CO₂放出実験計画

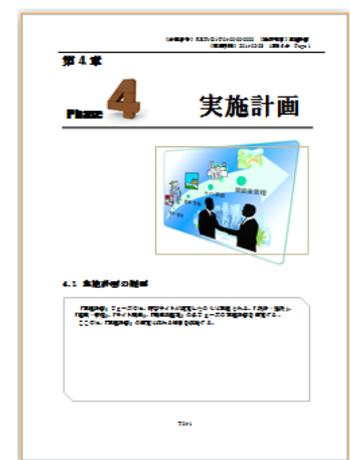
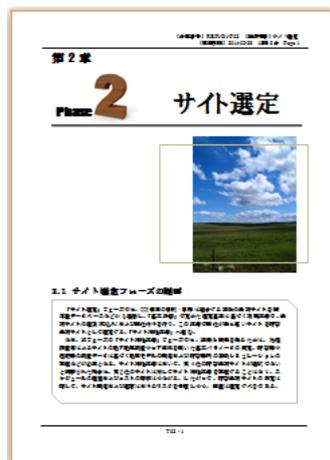
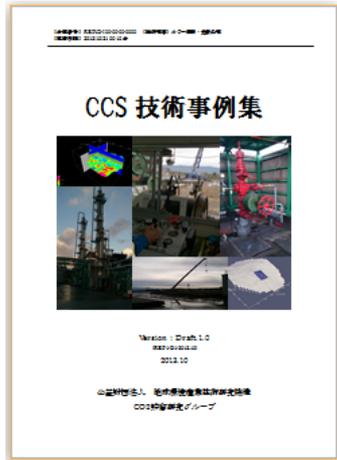
STEMM-CCS: 北海、2019年(予定)

CO₂放出実験: 3トン/14日

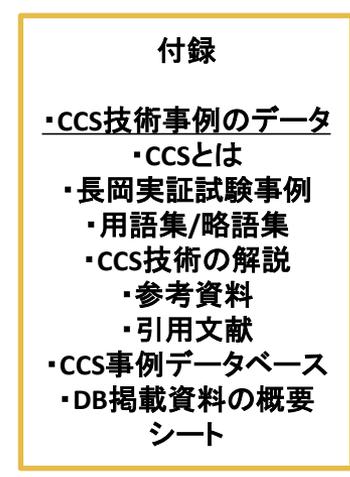
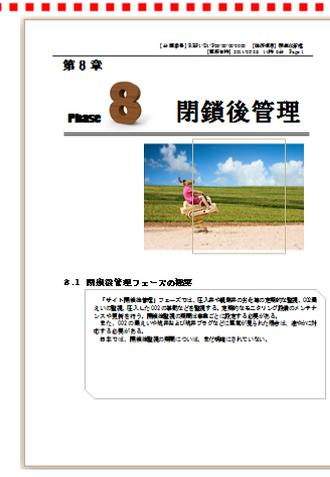
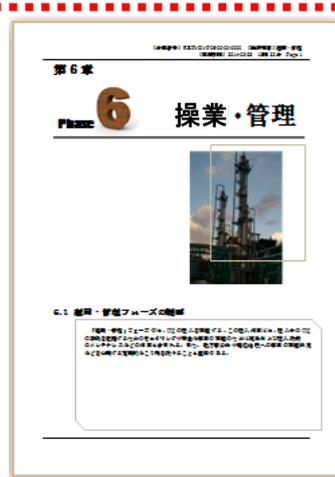
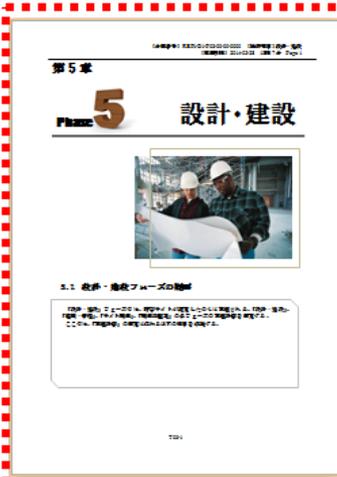
総予算: €15.9 M



CCS技術事例集の作成



長岡実証試験＋海外事例に基づき、Vol.1を完成 →→→ 逐次公開、英訳も決定



苫小牧大規模実証試験や海外の新規事例を加え、平成32年度末までにVol.2を完成

実用化・事業化に向けての課題

◎ Technical Gap (技術的課題)

- ✓ Up-scaling(大規模化)技術の確立(実証試験 →→→ 事業化へ)
- ✓ IntegrationとDown-scaling(技術の統合と絞り込み)による実用化技術の確立(実証試験から得た知見を基に)
- ✓ 漏出検出・環境影響評価総合システム構築等(海防法への対応)

◎ Non Technical Gap (技術以外の課題)

- ✓ 社会受容性の獲得 → PO/PA手法の構築
- ✓ CCS実施の仕組み作り → 法体系の検討、政策的支援
- ✓ 社会的認知度の向上 & 人材育成 → 温暖化のリスク認識、長期的視点 & グローバル戦略・対応